

**К.К. Джаманбалин
О. В. Тарабаева**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

**Учебник
для студентов инженерных
специальностей ВУЗов**

**г. Костанай
2005 год**

ББК 31.23 я73

Д 40

Рекомендовано в качестве учебного пособия учебно-методической секцией Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева

Джаманбалин К. К., Тарабаева О.В.

Д40 Электротехнические материалы: учебник для студентов, обучающихся в высших учебных заведениях на инженерных специальностях. – Костанай, 2005. – 127 с.

ISBN 9965-9273-5-9

В учебнике рассмотрены различные классы широко применяемых электротехнических материалов: проводников, полупроводников, диэлектриков; описаны основные свойства; изложены основы физических явлений, происходящих в них; представлены требования, предъявляемые к этим материалам; область их применения. Большое внимание уделено полупроводниковым приборам.

ББК 31.23 я73

Рецензенты:

доктор физико-математических наук Баймухамедов М.Ф.

доктор физико-математических наук Герасименко Н.Н.

Д $\frac{2202040000}{00(05) - 05}$

ISBN 9965-9273-5-9

©Джаманбалин К.К., Тарабаева О.В., 2005.

©КСТУ, 2005.

Содержание.

Содержание.....	3
Предисловие.....	5
1. Общие сведения о строении вещества.....	7
1.1. Виды связи.....	7
1.2. Кристаллическое строение вещества.....	9
1.3. Анизотропия кристаллов.....	12
1.4. Кристаллизация металлов.....	14
1.5. Дефекты кристаллического строения.....	16
1.6. Классификация электротехнических материалов.....	17
2. Методы изучения свойств и структуры материалов.....	20
2.1. Методы исследования структуры материалов.....	21
2.2. Основные свойства электроматериалов.....	23
2.3. Методы определения механических свойств.....	25
3. Основные сведения о проводниках.....	33
3.1. Классификация проводниковых материалов.....	33
3.2. Физические процессы в проводниках.....	35
3.3. Свойства проводниковых материалов.....	39
4. Материалы с высокой проводимостью.....	41
4.1. Медь и её сплавы.....	41
4.2. Алюминий и его сплавы.....	44
4.3. Железо и его сплавы.....	46
4.4. Сверхпроводники и криопроводники.....	47
5. Материалы с высоким сопротивлением.....	52
5.1. Проводниковые резистивные материалы.....	52
5.2. Пленочные резистивные материалы.....	57
5.3. Материалы для термопар.....	60
6. Проводниковые материалы и сплавы различного применения.....	62
6.1. благородные металлы.....	62
6.2. тугоплавкие металлы.....	63
7. Проводимость полупроводниковых материалов.....	65
7.1. Особенности полупроводников.....	65
7.2. Собственная проводимость.....	65

7.3. Примесная проводимость.....	67
8. Простые полупроводники.	71
8.1. Германий.....	71
8.2. Кремний.	75
9. Сложные полупроводники.	80
9.1. Сложные полупроводники типа $A^{IV}B^{IV}$	81
9.2. Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$	83
9.3. Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{IV}$ и другие халькогениды.....	91
10. Применение полупроводниковых материалов.....	97
10.1. Контакт полупроводника с металлом.	97
10.2. Контакт электронного и дырочного полупроводника.	102
10.3. Туннельные диоды.....	107
10.4. Лазеры.	109
11. Диэлектрические материалы.....	117
11.1. Назначение и классификация диэлектрических материалов.	117
11.2. Электрические свойства.	118
11.3. Механические свойства.....	120
11.4. Тепловые свойства.....	120
11.5. Влажностные свойства.....	121
11.6. Физико-химические свойства.....	122
Заключение.....	124
Литература.....	126

Предисловие.

Производство электротехнических материалов и особенно полупроводниковых в настоящее время достигло высокого уровня. Выпуск основных компонентов радиоэлектронной аппаратуры (интегральных дискретных элементов, полупроводниковых электровакуумных приборов и др.) исчисляется многими миллионами. Применение этих материалов позволяет получать изделия с высокой надежностью, быстродействием, устойчивостью к воздействиям окружающей среды, агрессивных сред, ударам, ионизирующих излучений, магнитных полей.

Использование высоких технологий при производстве элементной базы радиоэлектронных устройств и средств вычислительной техники становится возможным благодаря не только созданию специальных производственных условий и разработке специализированного оборудования и оснастки, но и внедрению новых основных вспомогательных материалов.

Чтобы правильно использовать электротехнические материалы, необходимо представлять себе физическую сущность явлений, характерных для каждого типа материалов при его взаимодействии с электрическими и магнитными полями, а также при влиянии на него основных физико-технологических факторов. Поэтому каждая часть учебника начинается с рассмотрения

физических процессов, происходящих в материалах. Без знания структуры электротехнических материалов невозможно правильное понимание электрических и магнитных материалов, их механической прочности, процессов старения и т.д.

Электротехнические материалы - это специальные материалы, из которых изготовляют электрические машины, аппараты, приборов и другие элементы электрооборудование и электроустановок. По поведению в электрическом поле эти материалы подразделяют на проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические, по поведению в магнитном поле - на магнитные и немагнитные. Эти свойства материалов используют для изготовления изделий с определенным функциональным назначением и в качестве вспомогательных.

1. Общие сведения о строении вещества.

1.1. Виды связи.

Для правильного выбора и эффективного использования материалов необходимо знание разнообразия их свойств, которое связано со строением вещества. Все вещества состоят из атомов. Атом представляет собой систему, состоящую из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны. Они притягиваются к ядру и отталкиваются друг от друга. Расположенные ближе к ядру электроны подвержены большему притяжению. Внешние электроны могут отрываться от одного атома и присоединяться к другому. Такие электроны называют *валентными*. Атом, потерявший электроны, становится положительно заряженным (*положительным ионом*), а атом, потерявший электроны, становится отрицательно заряженным (*отрицательным ионом*). Из атомов строятся молекулы. Связи, благодаря которым происходит объединение атомов в молекулы, называются химическими.

Ковалентные связи возникают между атомами за счет образования устойчивых пар валентных электронов разных атомов. Если двухатомная молекула состоит из атомов одного элемента (H_2 , N_2), то молекулу и ковалентную связь называют неполярными или нейтральными. Если двухатомная молекула состоит из атомов различных элементов, то ковалентную связь называют полярной. Вещества с

ковалентной связью обычно характеризуются твердостью, хрупкостью, тугоплавкостью. К ним относятся кристаллы германия, кремния, алмаза. Разновидностью ковалентной связи является донорно-акцепторная связь, которая возникает между атомом, способным отдать электрон (донор), и атомом, способным присоединить этот электрон (акцептор). Примером таких материалов являются соединения мышьяка – арсениды галлия и индия.

Ионные связи обусловлены силами электростатического притяжения между положительными и отрицательными ионами. Такие связи наиболее характерны для неорганических диэлектриков, которые имеют в своем составе ионы противоположных знаков (большинство солей и некоторые оксиды – ZnO , CdO , NiO). Соединения, образованные ионной связью, уступают веществам с ковалентной связью по механической прочности.

Металлические связи образуются в металлах и обусловлены особенностью поведения внешних электронов. Внешние электроны, которые покидают атомы, называются *коллективизированными*. Металл представляет собой систему, состоящую из положительных ионов, которые находятся в среде коллективизированных электронов. Благодаря наличию свободных электронов металлы обладают высокой электро- и теплопроводностью. Прочность металла обусловлена притяжением между ионами и электронами.

Молекулярные связи образуются между отдельными молекулами в результате электростатического притяжения между зарядами противоположных знаков, которые имеются в молекулах. С помощью таких сил образуются молекулы в твердом водороде H_2 , азоте N_2 , углекислом газе CO_2 , и других органических соединениях – полиэтилене, фторопласте.

1.2. Кристаллическое строение вещества.

В твердых веществах атомы и молекулы расположены в геометрически правильном порядке или хаотично. Вещества с упорядоченным расположением атомов или молекул называют кристаллическими, а вещества с беспорядочным расположением атомов или молекул – аморфными.

Кристаллические вещества. Большинство твердых тел обладает кристаллическим строением. Для описания структуры кристаллических тел пользуются понятием пространственная кристаллическая решетка, которая представляет собой пространственную сетку, в узлах которой располагаются частицы, образующие твердое тело. Кристаллические решетки можно классифицировать по виду частиц, образующих её, и по форме элементарной ячейки.

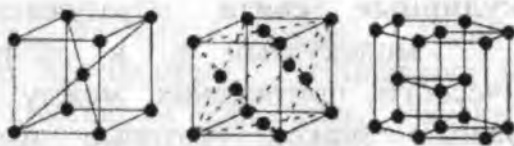


Рис. 1.2.1. Основные типы кристаллических решеток.

Простейшим типом элементарной кристаллической ячейки является простая кубическая решетка. Размеры кристаллической решетки характеризуются её параметрами. Под *параметром* решетки понимают расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку. Эти расстояния очень малы и измеряются в нанометрах или ангстремах. Параметр кубической решетки обозначается буквой a и находится в пределах $0,28...0,6$ нм.



Рис. 1.2.2. Элементарная ячейка кубической решетки.

Типы кристаллических решеток:

1. Кубическая объемно центрированная, её имеют хром (Cr), вольфрам (W), ванадий (V).
2. Кубическая гранецентрированная, её имеют медь (Cu), алюминий (Al).
3. Гексагональная, её имеют бериллий (Be), кадмий (Cd), магний (Mn).

В зависимости от вида частиц, образующих кристаллическую решетку, различают *ковалентные (атомные), ионные, металлические и молекулярные* кристаллические решетки. В узлах ковалентных (атомных) решеток находятся нейтральные атомы, связанные друг с другом ковалентной связью. В узлах ионных решеток располагаются положительные и отрицательные ионы, которые связаны друг с другом ионной связью. В узлах металлических решеток находятся положительные ионы, между которыми расположены свободные электроны. Положительные ионы и свободные электроны в металлической решетке связаны металлической связью. В узлах молекулярных решеток находятся молекулы.

Аморфные и аморфно-кристаллические вещества. Аморфные вещества — это вещества с беспорядочным расположением атомов или молекул. Они не имеют строго определенной температуры перехода из твердого состояния в жидкое. При понижении температуры у аморфных веществ, находящихся в твердом состоянии, происходит быстрое повышение вязкости.

Аморфные вещества делятся на две группы: простые аморфные — низкомолекулярные жидкости, неорганические стекла, плавленый кварц; высокополимерные соединения — каучук, резина, органические стекла, смола. Некоторые вещества могут находиться в аморфном и кристаллическом состояниях. Так как аморфное состояние менее

устойчиво, чем кристаллическое, то возможен самопроизвольный переход из аморфного состояния в кристаллическое. Пример: расстекловывание, то есть самопроизвольная кристаллизация стекла при повышенных температуре и давлении. С образованием мелких кристаллов стекло меняет свои оптические свойства и превращается в аморфно-кристаллический материал, называемый *ситаллом*.

1.3. Анизотропия кристаллов.

Ни одна упорядоченная кристаллическая решетка не является абсолютно симметричной. Этим обусловлено различие свойств металла в зависимости от направления, в котором они рассматриваются. Изменение свойств кристаллов в зависимости о выбранного направления называется *анизотропией*.

Для того чтобы задать направление в кристалле необходимо принять за начало системы координат одну из вершин кристаллической решетки, а в качестве осей – ребра, сходящиеся в этой вершине. Эти оси называют *кристаллографическими* и обозначают X, Y, Z. Положение кристаллографических плоскостей в пространстве определяют при помощи индексов Миллера.

Кристаллографические плоскости и их индексация представлены на рисунке.

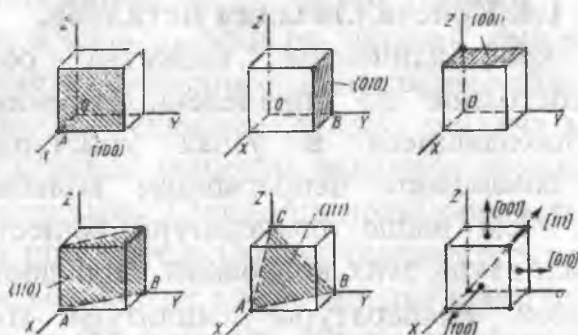


Рис. 1.3.1. Примеры обозначения направлений и кристаллических плоскостей в кубических кристаллах с помощью индексов Миллера.

Диагональные плоскости кубического кристалла имеют индексацию (110) , (101) , (011) , (111) . Плоскость, параллельная осям Y и Z , имеет индекс (100) , плоскость, параллельная осям X и Z – индекс (010) , плоскость, параллельная осям X и Y – индекс (001) .

Если кристаллическое тело состоит из одного большого кристалла, т.е. является *монокристаллическим*, то оно обладает анизотропией свойств. Металлы и сплавы, применяемые в технике, обычно имеют поликристаллическую структуру – состоят из большого количества кристаллов. Поэтому они имеют практически одинаковые свойства в различных направлениях и создается впечатление *изотропии* - независимости свойств от направления. Это явление называется *квазианизотропией*.

1.4. Кристаллизация металлов.

Все кристаллические вещества сохраняют твердое состояние до определенной температуры. Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, совершают непрерывные колебательные движения. Чем выше температура вещества, тем больше амплитуда этих колебаний. При достижении определенной температуры амплитуда колебаний атомов настолько увеличивается, что происходит разрушение кристаллической решетки. Атомы переходят в хаотическое состояние, а вещество превращается из твердого в жидкое. Температура, при которой происходит фазовое превращение твердого вещества в жидкое, называется *температурой плавления* $T_{пл}$. Обратный переход кристаллических веществ из жидкого состояния в твердое называется *кристаллизацией*. Температура соответственно – *температурой кристаллизации* $T_{кр}$. Кристаллизация состоит из двух этапов: зарождения мельчайших частиц кристаллов (центров кристаллизации) и роста кристаллов из этих центров. Форма, величина и направление роста кристаллов влияют на все свойства вещества.

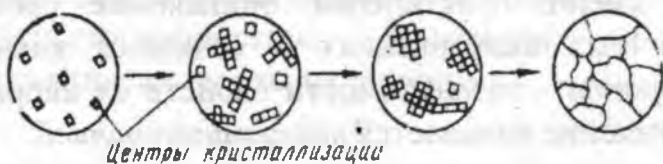


Рис. 1.4.1. Этапы процесса кристаллизации.

Полиморфизм (аллотропия). Многие вещества в зависимости от условий кристаллизации могут иметь различные кристаллические решетки. Способность вещества иметь различные формы кристаллической решетки называют *полиморфизмом* или *аллотропией*. Сущность полиморфизма состоит в том, что при определенных температурах в твердом веществе возникают новые центры кристаллизации, в процессе роста которых образуется новая решетка. Формирование новой решетки происходит с поглощением тепла при нагревании и с выделением тепла при охлаждении. Поэтому в период перестройки решетки температура остается неизменной, и на кривой охлаждения появляется горизонтальная площадка.

Различные полиморфные формы вещества называют *модификациями* и обозначают начальными буквами греческого алфавита (α , β , γ , δ и т.д.). Полиморфные превращения происходят в кобальте, железе, олове, титане, селене и других веществах.

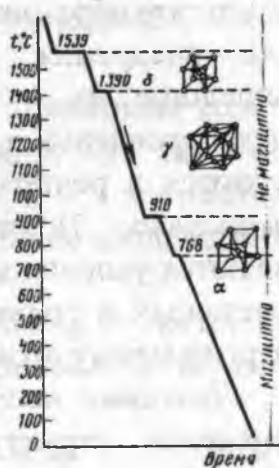


Рис. 1.4.2. Кривая охлаждения железа.

1.5. Дефекты кристаллического строения.

Реальная структура кристаллических тел в значительной степени отличается от идеальных моделей за счет наличия в них того или иного количества несовершенств, или *дефектов* кристаллической решетки. Присутствие этих дефектов оказывает большое влияние на все свойства кристаллических тел: электрические, магнитные, механические, оптические и химические. Основными дефектами кристаллических решеток являются точечные, линейные, поверхностные и объемные (трехмерные) несовершенства.

Точечные несовершенства появляются в результате образования вакансий (атомных дырок) или внедрения атомов в междоузлие. Атомы, вышедшие из узла решетки, называются *дислоцированными*, а места, где находились атомы, остаются в решетке незаполненными и называются *вакансиями*. Причинами точечных несовершенств являются условия кристаллизации, наличие примесей в металлах и сплавах, неравномерное распределение энергии между атомами кристаллической решетки.

Линейные несовершенства представляют собой изменения структуры, протяженность которых в одном измерении гораздо больше, чем в двух других. Такие несовершенства называют *дислокациями* (краевые, винтовые, смешанные). Появление дислокаций вызвано воздействиями на металл напряжений разного происхождения.

Поверхностные несовершенства характеризуются значительными изменениями в двух измерениях. Примером поверхностного несовершенства является граница между кристаллами в реальных сплавах.

Объемные несовершенства кристалла имеют существенные размеры во всех трех измерениях. К объемным дефектам относятся пустоты.

1.6. Классификация электротехнических материалов.

По назначению материалы, используемые в различных областях электроники, условно подразделяют на конструкционные и электротехнические.

Конструкционные материалы применяют для изготовления несущих конструкций, а так же вспомогательных деталей и элементов радиоприборов, работающих в условиях воздействия механических нагрузок.

Электротехнические материалы, которые находят применение в радиоэлектронике, называют электрорадиоматериалами.

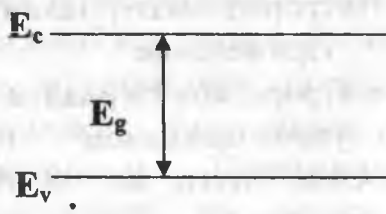
Применение тех или иных электрорадиоматериалов в приборостроении, полупроводниковом производстве обусловлено прежде всего их электрическими и магнитными свойствами.

Классификация материалов по электрическим свойствам. В процессе изготовления и в различных условиях эксплуатации на материалы воздействуют электрические и магнитные поля в отдельности и совместно. По поведению в электрическом поле материалы подразделяют на *проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические*. Эта классификация основана на представлениях зонной теории электропроводности твердых тел.

Как установлено многочисленными экспериментами, электроны в изолированном атоме могут находиться лишь на определенных орбитах, которым соответствуют строго определенные значения энергии - энергетические уровни. Согласно принципу Паули на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов. Под воздействием притяжения положительно заряженного атома ядра электроны стремятся занять ближайшие к ядру уровни с минимальным значением энергии. В результате нижние энергетические уровни оказываются заполненными электронами, а верхние - свободными.

Зона, заполненная электронами, называется *валентной (E_v)*. Свободная зона называется *зоной проводимости (E_c)*.

Промежуток между



валентной зоной и зоной проводимости называется *запретной зоной* (E_g). Значение этой зоны влияет на свойства материалов. Если E_g приближается к нулю, то такие вещества относят к *проводникам* (металлы). Если E_g больше нескольких эВ, то такие вещества относят к *диэлектрикам*. (1 эВ – это энергия электрона, полученная им при перемещении между двумя точками электрического поля с разностью потенциалов 1В). Если значение E_g 0,1...0,3 эВ, то электроны легко переходят из валентной зоны в зону проводимости благодаря внешней энергии. Вещества с управляемой проводимостью относят к *полупроводникам*.

Основным свойством вещества по отношению к электрическому полю является *электропроводность*, характеризующая способность материала проводить электрический ток под воздействием постоянного электрического поля. Электропроводность характеризуется *удельной электрической проводимостью* γ и *удельным электрическим сопротивлением* ρ .

$$J = \gamma * E = E / \rho$$

J – плотность тока, $\gamma = [Cм/м]$, E – напряженность $[В/м]$, $\rho = 1 / \gamma [Ом*м]$.

Классификация материалов по магнитным свойствам. По характеру взаимодействия с внешним магнитным полем все электрорадиоматериалы подразделяются на *магнитные и немагнитные*.

Немагнитные материалы не приобретают магнитных свойств при воздействии на них магнитного поля. Магнитные материалы обладают способностью намагничиваться.

По силе взаимодействия с магнитным полем материалы подразделяют на *слабомагнитные (диамагнетики, парамагнетики) и сильномагнитные (ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики).*

Магнитная восприимчивость:

$k_m = M/H$, M – намагниченность вещества [$A \cdot m^{-1}$], H – напряженность магнитного поля [$A \cdot m^{-1}$].

Слабомагнитные материалы - $k_m \ll 1$.
Диамагнетики - $k_m = -10^{-5}$ (медь, серебро, золото, свинец). Парамагнетики $k_m = 10^{-2} \dots 10^{-5}$ (алюминий, платина).

Сильномагнитные материалы - $k_m \gg 1$.
Ферромагнетики $k_m = 10^3 \dots 10^5$ (железо, никель, кобальт и их сплавы, сплавы хрома и марганца). Антиферромагнетики – $10^{-3} \dots 10^{-5}$. Ферримагнетики подобны ферромагнетикам, но уступают им по значению намагниченности насыщения (предельная намагниченность).

2. Методы изучения свойств и структуры материалов.

Физические свойства материала определяются его составом и структурой. Влияние структуры часто столь велико, что материалы одного состава, но

различной структуры могут отличаться по физическим свойствам. Поэтому исследованию структуры электроматериалов уделяется большое внимание.

Детали из электроматериалов подвергаются в процессе изготовления, сборки и эксплуатации воздействию различных механических нагрузок. Следовательно испытание механических свойств имеет большое практическое значение для всех материалов.

2.1. Методы исследования структуры материалов.

Методы исследования структуры материалов разнообразны и предназначены для изучения как макро-, так и микроструктуры.

1. Макроанализ проводят визуальным методом (невооруженным глазом) или с небольшим увеличением (5 – 30 раз). Таким методом изучают изломы отливок, поковок, сварных швов и вышедших из строя деталей машин. По виду излома можно определить и способе производства деталей, а также виде термической причины поломки.
2. Микроанализ применяют для исследования микроструктуры металлов и сплавов с увеличением (50 – 2000 раз). Для этого используют цветные и металлографические микроскопы. Объектом исследования служит

шлиф, изготавливающийся из специального образца или изделия.

3. Рентгеновский анализ подразделяется на рентгенографический и рентгеноструктурный. Этот метод основан на отражении рентгеновских лучей от атома кристаллической решетки исследуемого объекта. Рентгенографический анализ позволяет определить внутренние дефекты. Рентгеноструктурный анализ определяет тип и параметры кристаллической решетки.
4. Термический анализ состоит в определении тепловых эффектов и фиксации температур фазовых превращений и сплавов, которые сопровождаются поглощением или выделением теплоты.
5. Дилатометрический метод основан на изменении объема или длины образца в результате фазовых превращений при нагреве и охлаждении.
6. Метод электросопротивления основан на том, что сопротивление меняется с изменением структуры и фазового состава сплава при температурном воздействии.
7. Ультразвуковой анализ основан на определении ультразвуком впадины плоскости.
8. Магнитный метод основан на изменении магнитных свойств сплав с изменением его внутреннего строения при тепловом воздействии в результате перехода из парамагнитного

состояния в ферромагнитное состояние и наоборот.

2.2. Основные свойства электроматериалов.

К механическим свойствам относят твердость, упругость, вязкость, пластичность, линейное расширение, хрупкость, прочность, усталость.

Твердость – это способность материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого. Методы определения твердости: вдавливание, царапание, упругая отдача.

Упругость – это свойство материала восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних сил, которые вызывают их изменение.

Вязкость – это способность материала оказывать сопротивление динамическим (быстрвозрастающим) нагрузкам.

Пластичность – это свойство материала деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять новую форму после прекращения действия этих сил.

Температурный коэффициент линейного расширения позволяет определить изменения любых геометрических размеров изделий (длины, ширины, толщины) при нагревании.

Хрупкость – это способность материалов разрушаться при приложении резкого динамического усилия.

Прочность – это способность материала

сопротивляться действию внешних сил, не разрушаясь.

Усталость - это разрушение материала под действием небольших повторных или знакопеременных нагрузок (вибрации). Пример: пружина.

Свойство металла выдерживать, не разрушаясь, большое число повторных или знакопеременных напряжений называется *выносливостью*.

К физико-химическим свойствам относят цвет, плотность, температура плавления, теплопроводность, тепловое расширение, электропроводность, магнитные свойства, поглощение газов, коррозионную стойкость и другие.

По плотности металлы разделяют на легкие и тяжелые. К *легким* относят те металлы, плотность которых меньше 5 мг/м^3 (натрий). К *тяжелым* относят большинство металлов, используемых в технике (железо, медь, никель, олово).

К технологическим свойствам относятся — ковкость, свариваемость, обрабатываемость резанием, литейные свойства.

Ковкость — склонность металла к значительным легко выполняемым пластическим деформациям без разрушения и образования дефекта.

Свариваемость - способность металла свариваться при комнатных и низких температурах с образованием прочных сварных швов или соединений.

Обрабатываемость резанием - способность металла обрабатываться всеми видами режущих инструментов при больших скоростях резания с получением определенного технологией качества поверхности.

Литейные свойства – способность жидких металлов заполнять литейные формы и образовывать плотные отливки. Они обусловлены жидкой текучестью, ликвацией (склонность к неоднородному распределению примесей в отливке), усадкой.

2.3. Методы определения механических свойств.

К основным методам технических испытаний механических свойств материалов относят испытания на прочность, пластичность и твердость. Эти испытания проводят при статическом воздействии на материал, т.е. при длительно действующих внешних нагрузках. Испытания материалов на ударную вязкость, на устойчивость к вибрациям проводят при динамическом воздействии на материал, т.е. при кратковременных нагрузках, возникающих при вибрациях, ударах.

Определение твердости. Существует более 30 способов определения твердости. Из них выделяют 3 основных:

- 1.Способ Бриннеля.
- 2.Способ Роквелла.
- 3.Способ Виккерса.

1. В поверхность испытуемого металла вдавливают стальной закаленный шарик диаметром 10, 5 или 2,5 мм. В результате на поверхности металла получается отпечаток (лунка). Диаметр отпечатка измеряют специальной лупой с делениями. Число твердости по Бриннелю HB (в Па или кгс/мм²) характеризует отношение нагрузки, действующей на шарик, к поверхности отпечатка:

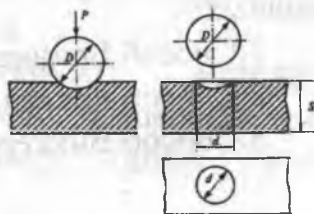
$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

, где P – нагрузка на шарик, Н (кгс); F – поверхность отпечатка, мм; D – диаметр вдавливаемого шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Недостатки:

1. Нельзя испытывать материал с большой твёрдостью.
2. На поверхности образуется лунка и деталь не пригодна к эксплуатации.
3. Нельзя испытывать тонкие пластинки.
4. Нельзя испытывать крупногабаритные изделия.

Рис. 2.3.1.1. Схема определения твердости материала по методу Бриннеля.



2. Способ Роквелла основан на вдавливании в поверхность образца стального закаленного шарика ($d = 1,6$ мм) или алмазного конуса. Твёрдость по Роквеллу измеряется на приборах «ТК», которые имеют три шкалы твёрдости: А, В, С. Конус или шарик вдавливают в образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок – предварительной P_0 и основной P_1 . Общая нагрузка P равна их сумме:

$$P = P_0 + P_1.$$

Предварительная нагрузка P_0 во всех случаях равна 100 Н (10 кгс), а основная и общая нагрузки составляют:

1 При вдавливании алмазного конуса (шкала А, обозначение HRA)

$$P_1 = 500 \text{ Н (50 кгс); } P = 600 \text{ Н (60 кгс)}$$

При вдавливании шарика (шкала В, обозначение HRB)

$$P_1 = 900 \text{ Н (90 кгс); } P = 1000 \text{ Н (100 кгс)}$$

3 При вдавливании алмазного конуса (шкала С, обозначение HRC)

$$P_1 = 1400 \text{ Н (140 кгс); } P = 1500 \text{ Н (150 кгс)}$$

Твёрдость определяют по глубине отпечатка h . За единицу твёрдости принято условная величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. Число твёрдости показывается сразу на шкале прибора.

Шкалой А пользуются при измерении твёрдости изделий после химико -термической обработки и твёрдых сплавов.

Шкалой В пользуются при измерении твердости мягких металлов (незакаленные стали, цветные металлы и их сплавы).

Шкалой С пользуются при измерении твёрдости закаленной стали.

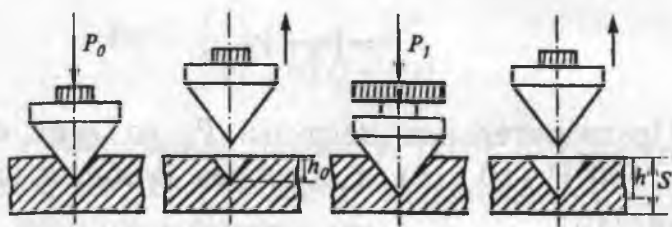


Рис. 2.3.1.2. Схема определения твердости материала по методу Роквелла.

3. Способ Виккерса основан на вдавливании в поверхность металла четырёхгранной алмазной пирамиды при нагрузках 10-1000 Н с выдержкой под нагрузкой 10-15 секунд. По нагрузке, приходящейся на единицу поверхности отпечатка, определяют число твёрдости, обозначаемое HV (в Па или кгс/мм²):

$$HV = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

, где P - нагрузка на пирамиду, Н (кгс); d – среднее

арифметическое длинны обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм; α - угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равной 136° .

При испытании применяют нагрузки 50-1000 Н (5-100 кгс). Возможность применения малых нагрузок позволяет испытывать материалы тонкого сечения и твёрдые поверхностные слои. Для определения числа твёрдости HV по величине диагонали отпечатка используют специальные таблиц.

Определение прочности. Прочность определяют с помощью статического воздействия (растяжения) материала на специальных испытательных установках, называемых *разрывными машинами*. Для испытания на растяжение из материала изготавливают образцы в виде круглых стержней или пластин строго установленных размеров. Образцы головками закрепляют в зажимах разрывной машины. При приложении к образцу растягивающей нагрузки F на самопишущем приборе машины вычерчивается кривая увеличения растягивающего усилия F и удлинения образца Δl в результате его деформации растягивающей нагрузкой. Получается диаграмма растяжения; на ней можно отметить несколько характерных точек.

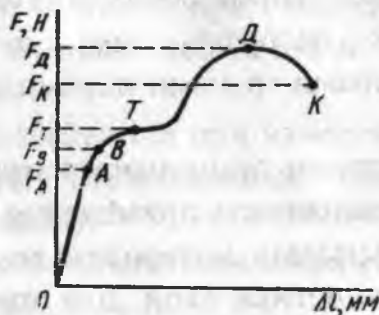


Рис. 2.3.2.1. Диаграмма растяжения мягкой стали.

В начале диаграмма представляет собой прямую линию (ОА), следовательно, между удлинением и приложенной силой существует прямо пропорциональная зависимость. На этом участке происходит только упругая деформация, которая исчезает после снятия нагрузки. Точка А – это предел пропорциональности. Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$ – это напряжение, выше которого нарушается пропорциональность между прилагаемым напряжением и деформацией образца.

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{F_A}{S_0},$$

где F_A – нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности, Н, кгс; S_0 – первоначальное сечение образца, м^2 .

В точке В наступает предел упругости металла и

происходит пластическая деформация совместно с упругой и на образце образуется «шейка». Предел упругости $\sigma_{упр}$ - это напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05% начальной длины образца.

$$\sigma_{упр} = \frac{F_B}{S_0},$$

где F_B - нагрузка, соответствующая пределу упругости, Н, кгс; S_0 - первоначальное сечение образца, м^2 .

В точке Т, которая находится на горизонтальном участке, наблюдается некоторое удлинение образца без заметного увеличения нагрузки. Точка Т является пределом текучести. Предел текучести (физический) σ_T - это наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки.

$$\sigma_T = \frac{F_T}{S_0},$$

где F_B - нагрузка, соответствующая физическому пределу текучести, Н, кгс; S_0 - первоначальное сечение образца, м^2 .

В точке Д, где действует максимальная нагрузка F_d , в образце наступает наибольшее напряжение, которое называется пределом прочности испытуемого

металла. Пределом прочности при напряжении $\sigma_{пр}$ (измеряемым в Па) называют напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке F_D , предшествующей разрушению образца.

$$\sigma_{пр} = \frac{F_D}{S_0},$$

где F_B — нагрузка, соответствующая пределу прочности, Н, кгс; S_0 — первоначальное сечение образца, м^2 .

Дальнейшая деформация образца сосредоточивается на участке наименьшего сопротивления, по которому происходит разрушение образца при нагрузке F_K .

Определение пластичности. Для количественной оценки пластичности электроматериалов используют параметры: относительное удлинение образца $\Delta l/l$ и относительное сужение площади поперечного сечения образца ψ .

Относительным удлинением называют отношение абсолютного удлинения образца к его первоначальной длине l_0 , выраженное в процентах:

$$\Delta l / l = \frac{l_p - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

где l_p – длина образца после разрыва.

Относительным сужением называют отношение абсолютного сужения площади поперечного сечения образца после разрыва к его первоначальной площади поперечного сечения:

$$\psi = \frac{S_0 - S_p}{S_0} \cdot 100\%,$$

где S_p – площадь поперечного сечения образца после разрыва.

У пластичных материалов значения $\Delta l/l$ и ψ достигают нескольких десятков процентов. Например, у металлов они в среднем составляют: у

меди - $\Delta l/l \approx 40\%$ и $\psi \approx 75\%$; у алюминия - $\Delta l/l \approx 40\%$ и $\psi \approx 85\%$.

3. Основные сведения о проводниках.

3.1. Классификация проводниковых материалов.

Проводники, используемые в современной технике, по агрегатному состоянию разделяют на газообразные, жидкие, твердые.

К газообразным проводникам относят пары веществ и газы при таком значении напряженности электрического поля, которое обеспечивает начало процесса ионизации молекул. Ионизированный газ представляет собой проводник, в котором перенос электрических зарядов осуществляется как электронами, так и ионами.

Проводимость газов и паров широко используется в различных газоразрядных приборах. *Плазма* – это сильно ионизированный газ, в единице объема которого число электронов равно числу положительных ионов.

Твердые металлы и их сплавы называют проводниками с электронной электропроводностью или *проводниками I рода*. Металлы в твердом состоянии являются кристаллическими веществами, для которых характерен особый вид металлической связи между атомами. Электропроводность металлов, как в твердом, так и в жидком состоянии обусловлена переносом электрических зарядов только электронами. Твердые проводники являются важнейшими проводниковыми материалами, широко применяемыми в радиоэлектронике и электротехнике.

К жидким проводникам относят различные растворы и расплавы солей, кислот, щелочей и других веществ, проводящие электрический ток. Их называют *электролитами* или *проводниками II рода*. Прохождение тока через электролит связано с переносом ионов растворенного вещества и растворителя. Электролиты широко используются в технике, в частности в технологии изготовления различных элементов радиоэлектронных устройств. Жидкими проводниками являются также расплавы металлов.

По характеру применения в радиоэлектронных приборах проводниковые материалы разделяют на

металлы высокой проводимости и сплавы высокого сопротивления.

Металлы высокой проводимости (серебро, медь, алюминий, железо, золото и др.) используют для изготовления проводов, микро проводов, проводящих покрытий и пленок, различных токопроводящих деталей.

Сплавы высокого сопротивления (медно-марганцевые сплавы, медно-никелевые сплавы, сплавы железа, никеля, хрома) применяют при изготовлении резисторов и резистивных элементов различных типов назначения, а также разнообразных электронагревательных элементов и т.п.

3.2. Физические процессы в проводниках.

Для твердых металлических проводников характерны высокие электро- и теплопроводность, обусловленные особенностями металлической связи между атомами, в частности наличием в проводнике среды коллективизированных электронов («электронного газа»). Наличие электронного газа в металлах легко подтверждают экспериментально. Например, в момент остановки быстро двигавшегося проводника между его концами появляется разность потенциалов, что объясняется смещением электронного газа по инерции к одному краю проводника. Далее, при нагревании металлов наблюдают вылет (эмиссию) электронов. Это становится понятным если учесть, что скорости

теплового движения электронов возрастают с ростом температуры металла и достигают такой величины, которая достаточна для вылета электронов наружу из металла.

Средние скорости теплового движения электронов в различных проводниках примерно одинаковы, незначительно отличаются также и концентрация свободных электронов n . Например, в нормальных условиях для меди $n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, а для алюминия $n = 8,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Наиболее существенно у различных проводников отличаются значения подвижности электронов (μ), обусловленной действием электрического поля, и средняя длина свободного пробега молекул ($l_{\text{ср}}$), зависящие от структуры и состава проводника и определяющие его сопротивление электрическому току. Любые искажения правильности кристаллической решетки металла (примеси, вакансии, деформация решетки) приводят к снижению значений μ , $l_{\text{ср}}$ и к повышению удельного сопротивления проводникового материала. Поэтому материалы высокой проводимости (чистые металлы) должны иметь совершенную кристаллическую структуру, находиться в ненапряженном (отожженном) состоянии и практически не содержать примесей. Материалы высокого сопротивления — это, как правило, различные сплавы, содержащие несколько резко отличающихся по свойствам металлов. Эти материалы часто имеют весьма мелкозернистую структуру с большим числом дефектов (например,

резистивные металлические пленки). Сам материал, как правило, находится в напряженном состоянии, создаваемом механической и термической обработкой (прокатом, волочением, закалкой и т.д.). Все это приводит к минимальным значениям l_{cp} и μ и соответственно к максимальным значениям ρ .

Характерным свойством всех металлов и сплавов является повышение их электрического сопротивления с ростом температуры. В этом случае происходит усиление колебательных движений атомов кристаллической решетки металла и хаотических движений свободных электронов, в результате чего снижаются значения средней длины свободного пробега молекул l_{cp} и их подвижности μ .

Классическая теория электропроводности (теория «электронного газа») объясняет также возникновение *термоэлектродвижущей силы* на контакте двух металлов.

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов U . Ее появление обусловлено различием концентраций свободных электронов (n_A , n_B) в соприкасающихся металлах А и В, что приводит по законам диффузии к переходу части электронов в металл с меньшей их концентрацией. Однако, чтобы покинуть пределы металла, электрон должен иметь определенную энергию, называемую *работой выхода электрона* $W_{вз}$. Эта величина характерна для каждого проводника и определяет, в частности, эмиссионные

свойства металла, т.е. его способность быть источником электронов.

Величина контактной разности потенциалов для различных пар металлов колеблется в пределах от десятых долей вольта до нескольких вольт. Если в замкнутой цепи двух проводников один контакт нагреть до температуры t_1 , другой – до температуры t_2 , то в цепи возникнет термоЭДС, измеряемая в В:

$$U = K(t_1 - t_2),$$

где K – коэффициент термоЭДС, постоянный для данной пары проводников, В/К.

Такая пара изолированных друг от друга различных проводников со спаем на конце, называемая *термопарой*, широко используется в технике для температурных измерений.

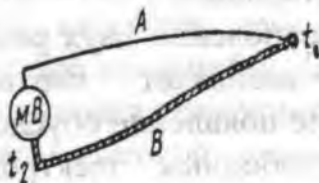


Рис. 3.2.1. Схема термопары.

Высокая теплопроводность металлов также легко объясняется посредством передачи тепловой энергии атомов нагретого участка металла атомам холодного участка за счет переноса этой энергии коллективизированными электронами. Так как механизм электропроводности и теплопроводности в

металлах обусловлен одними и теми же факторами – движением электронного газа и его плотностью, - становится понятным, почему металлы с высокой электропроводностью являются также хорошими проводниками тепла и почему диэлектрики обладают не только низкой электропроводностью, но и низкой теплопроводностью.

3.3. Свойства проводниковых материалов.

Основными параметрами, определяющими свойства проводниковых материалов, являются: 1) удельное электрическое сопротивление ρ ; 2) температурный коэффициент удельного сопротивления $\text{TK}\rho$ или α_ρ ; 3) температурный коэффициент линейного расширения $\text{TK}l$.

Удельное электрическое сопротивление ρ проводника с сопротивлением R постоянным поперечным сечением S и длиной l вычисляют по формуле

$$\rho = R \frac{S}{l}.$$

Величину, обратную ρ , называют *удельной электрической проводимостью* γ и измеряют в См/м. Значения ρ металлов в нормальных условиях отличаются друг от друга примерно в 100 раз. По величине ρ при нормальной температуре проводниковые материалы делят на *материалы высокой проводимости* ($\rho \leq 0,1$ мкОм*м) и *материалы с высоким сопротивлением* ($\rho \geq 0,3$).

мкОм*м).

Температурный коэффициент удельного сопротивления проводников, измеряемый K^{-1} , при данной температуре вычисляют по формуле

$$TK\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT},$$

где $d\rho$ – элементарное превращение сопротивления проводника, соответствующее элементарному превращению температуры dT .

Средний температурный коэффициент удельного сопротивления металлов α_p в диапазоне температур вычисляют по формуле

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{T - T_0},$$

где ρ_0 , ρ_T – значения ρ , соответствующие температурам измерения T_0 и T .

Значения $TK\rho$ металлов положительны и для большинства чистых металлов в нормальных условиях составляют в среднем $4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

Для проводников, используемых в электровакуумных приборах, важной механической характеристикой материала является температурный коэффициент линейного расширения, позволяющий определить изменение любых геометрических размеров изделий (длины, ширины, толщины) при

нагревании. Однако наиболее легко изменение размеров изделия при нагревании фиксируется по максимальному размеру — длине. Различают температурный коэффициент длины при данной температуре (TKl) и его среднее значение в интервале температур (α_l):

$$TKl = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}; \quad \alpha_l = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_T - l_0}{T - T_0},$$

где l_0 , l_T — геометрические размеры изделий, соответствующие температурам T_0 и T .

Минимальные значения TKl характерны для тугоплавких металлов, которые используют для получения вакуумно-плотных спаев со стеклом, керамикой и другими диэлектрическими материалами.

4. Материалы с высокой проводимостью.

К материалам этого типа предъявляются следующие требования: минимальное значение удельного электрического сопротивления, высокие механические свойства, способность легко обрабатываться, коррозионная стойкость.

4.1. Медь и её сплавы.

Медь является одним из самых распространенных материалов проводимости. Свойства меди:

- малое удельное электрическое сопротивление;
- высокая механическая прочность;
- удовлетворительная коррозионная стойкость;
- хорошая паяемость и свариваемость;
- хорошая обрабатываемость.

Медь получают чаще всего в результате переработки сульфидных руд. Примеси снижают электропроводность меди. Наиболее вредными из них являются фосфор, железо, сера, мышьяк. Содержание фосфора примерно 0,1% увеличивает сопротивление меди на 55%. Примеси серебра, цинка, кадмия дают увеличение сопротивления на 1...5%. Поэтому медь, предназначенная для электротехнических целей, обязательно подвергается электролитической очистке.

При холодной протяжке получают твердую медь (МТ), которая обладает высоким пределом прочности при растяжении, твердостью и упругостью. МТ применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую механическую прочность, твердость и сопротивляемость истиранию: для контактных проводов, шин распределительных устройств, для изготовления экранов, токопроводящих жил кабелей и проводов диаметром до 0,2 мм.

После отжига до нескольких сотен градусов (медь кристаллизуется при температуре 270 °С) с последующим охлаждением получают мягкую медь (ММ). Мягкая медь имеет проводимость на 3...5%

выше, чем у твердой меди. ММ широко применяется для изготовления фольги и обмоточных проводов.

Таблица 4.1.1. Свойства медной проволоки.

Свойства.	МТ	ММ
Плотность, D , кг/м ³	$8,96 \cdot 10^3$	$8,90 \cdot 10^3$
Удельное электрическое сопротивление, ρ , мкОм*м, не более	0,0179 ... 0,0182	0,0175
Предел прочности при растяжении σ_r , Мпа, не менее	360 ... 390	260 ... 280
Относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$, %	0,5 ... 2,5	18 ... 35

Бронзы. Сплавы меди с примесями олова, алюминия, кремния, бериллия и других элементов, среди которых цинк не является основным легирующим элементом, называют *бронзами*. Бронзы маркируют буквами Бр, после которых ставят буквы, обозначающие вид и количество легирующих добавок. Например, бериллиевая бронза Бр.В 2 (2% бериллия, остальной медь). Кадмиевую бронзу МК (0,9% кадмия, остальное медь) применяют для контактных проводов, сварочных электродов при контактных методах сварки. Фосфористая бронза Бр.ОФ 6,5 - 0,15 (6,5% олова, 0,15% фосфора, остальное медь) отличается низкой электропроводностью. Из неё изготавливают различные малоответственные токопроводящие пружины в электроприборах.

Таблица 4.1.2. Основные свойства проводниковых бронз.

Параметр.	Кадмиевая	Бериллиевая	Фосфористая
Удельная электропроводность по отношению к электротехническому стандарту, %	95/90	37/30	(10 ... 15) / (10 ... 15)
Предел прочности при растяжении σ_r , Мпа	До 310/730	(700...790) / (1620...1750)	400/970
Относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$, %	50/4	20/9	50/3

Латуни. Латуни представляют собой медные сплавы, в которых основным легирующим элементом является цинк (до 43%). Латуни хорошо штампуются и легко подвергаются глубокой вытяжке (колпачки радиотехнических ламп, экраны корпусов). Маркировка: после буква Л ставятся буквы, которые указывают на наличие легирующих элементов (кроме меди). Например, Л59-1 (59% меди, 1% свинца, остальное цинк), Л68 (68% Cu, 32% Zn).

Таблица 4.1.3. Свойства некоторых латуней.

Свойства.	Л68	Л59-1
Удельная проводимость по отношению к электротехническому стандарту меди, %	46/30	30/20
Предел прочности при растяжении σ_r , МПа	380/880	350/450
Относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$, %	65/5	25/5

4.2. Алюминий и его сплавы.

Алюминий относится к так называемым легким металлам. Он обладает следующими особенностями: удельное электрическое сопротивление алюминия в 1,63 раза больше меди; алюминий легче меди в 3,5 раза; нагревание алюминиевого провода до расплавления требует больших затрат энергии; стоимость алюминиевой проволоки почти вдвое ниже меди, но это менее выгодно из-за затрат на изоляцию; алюминий на воздухе активно окисляется и покрывается оксидной пленкой, которая предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии; алюминий менее дефицитен, чем медь; примеси

значительно снижают проводимость меди. Промышленность выпускает алюминиевую проволоку следующих марок: АТП – твердая повышенной прочности, АТ – твердая, АПТ – полутвердая, АМ – мягкая.

Алюминиевые сплавы. Сплав *альдрей* (0,3 ... 0,5% меди, 0,4 ... 0,7% кремния, 0,2 ... 0,3% железа, остальное алюминий) применяется для изготовления проводов малонагруженных ЛЭП. *Магналий* (сплав алюминия с магнием) отличается низкой плотностью, применяется для изготовления стрелок различных электрорадиотехнических приборов. *Силумин* относится к группе сплавов с повышенным содержанием кремния, меди и марганца. Он обладает хорошей жидкотекучестью, большой плотностью и повышенной прочностью. *Дюраль* принадлежит к деформируемым сплавам алюминия с медью, магнием и марганцем. Медь и магний улучшают механические свойства сплава, а марганец увеличивает твердость и коррозионную стойкость. Для защиты от коррозии его покрывают лаками, красками или слоем алюминия.

Таблица 4.2.1. Свойства алюминиевой проволоки.

Свойства.	АТ	АМ
Плотность, D , кг/м ³	2600...2700	2600...2700
Удельное электрическое сопротивление ρ , мкОм*м, не более	0,0295	0,0290
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа, не менее	160...170	80
Относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$, %	1,5...2,0	10...18

4.3. Железо и его сплавы.

Железо обладает следующими свойствами: более высокое по сравнению с медью и алюминием удельное электрическое сопротивление; высокая механическая прочность; дешевизна и доступность материала; технологичность (хорошо штампуются и обрабатываются во всех металлорежущих станках). Железо используют при разработке нагрывостойких сплавов и сплавов с высоким сопротивлением, в которые железо входит как необходимая составная часть. Его применяют в изготовлении элементов, работающих при температуре до 500°C .

Стали. Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 0,05% принято называть техническим железом, с содержанием углерода 0,05 ... 1,35% - сталями, а с содержанием углерода свыше 2% - чугунами. Углерод определяет структуру и свойства стали. С увеличением содержания углерода повышается твердость и снижается вязкость. Кроме углерода железоуглеродистые сплавы всегда содержат примеси кремния (0,1 ... 0,37%), марганца (0,2 ... 0,8%), серы (0,03 ... 0,06%) и фосфора (0,03 ... 0,07%). Кремний повышает твердость, сопротивляемость разрыву и упругие свойства стали. Марганец обладает такими же свойствами. Сера является вредной примесью. Присутствие серы в количестве выше допустимого ухудшает прочность, пластичность и коррозионную стойкость, повышает истираемость и изнашиваемость изделий. Фосфор также является вредной примесью.

Его повышенное содержание вызывает в стали хрупкость при обычных температурах и появление трещин при ударной деформации. Обозначение стали: Сталь 10 – содержание углерода 0,1%.

4.4. Сверхпроводники и криопроводники.

Известно 27 чистых металлов и более тысячи различных сплавов и соединений, у которых возможен переход в сверхпроводящее состояние. К ним относятся чистые металлы, сплавы, интерметаллические соединения и некоторые диэлектрические материалы.

Сверхпроводники. При понижении температуры удельное электрическое сопротивление металлов уменьшается и при весьма низких (криогенных) температурах электропроводность металлов приближается к абсолютному нулю.

В 1911 году при охлаждении кольца из замороженной ртути до температуры 4,2 К голландский ученый Г. Каммерлинг – Оннес обнаружил, что электрическое сопротивление кольца внезапно падает до очень малого значения, которое невозможно измерить. Такое исчезновение электрического сопротивления, т. е. Появление бесконечной удельной проводимости у материала, было названо сверхпроводимостью. Материалы, обладающие способностью переходить в сверхпроводимое состояние при их охлаждении до достаточно низкой температуры, называются сверхпроводниками.

Критическая температура охлаждения, при которой происходит переход вещества в сверхпроводящее состояние, называют температурой сверхпроводимого перехода или критической температурой перехода $T_{кр}$. Переход в сверхпроводимое состояние является обратимым. При повышении температуры до $T_{кр}$ материал возвращается в нормальное (непроводящее) состояние.

В 1933 году немецкие физики В. Майснер и Р. Оксенфельд обнаружили, что сверхпроводники при переходе в сверхпроводящее состояние становятся идеальными диамагнетиками (слабомагнитные материалы), т. е. Их магнитная проницаемость μ скачком падает от $\mu = 1$ до $\mu = 0$. Поэтому внешнее магнитное поле не проникает в сверхпроводящее тело. Если переход материала в сверхпроводящее состояние происходит в магнитном поле, то поле «выталкивается» из сверхпроводника.

Известные сверхпроводники имеют весьма низкие критические температуры перехода. Поэтому устройства, в которых используются сверхпроводники, должны работать в условиях охлаждения жидким гелием (примерно 4,2 К). Это усложняет и удорожает производство и эксплуатацию сверхпроводниковых материалов.

Возможности использования явления сверхпроводимости определяются значениями температуры перехода в сверхпроводящее состояние $T_{кр}$ критической напряженности магнитного поля $H_{кр}$.

Сверхпроводниковые материалы подразделяют на мягкие и твердые.

К мягким сверхпроводникам относят чистые металлы, за исключением ниобия, ванадия, теллура. Основным недостатком мягких сверхпроводников является низкое значение критической напряженности магнитного поля $H_{кр}$. В радиотехнике мягкие сверхпроводники не применяются, поскольку сверхпроводящее состояние в этих материалах исчезает уже в слабых магнитных полях при небольших плотностях тока.

К твердым сверхпроводникам относятся сплавы с искаженными кристаллическими решетками. Они сохраняют сверхпроводимость даже при относительно больших плотностях тока и сильных магнитных полях. Твердые сверхпроводники обладают рядом особенностей:

- При охлаждении переход в сверхпроводящее состояние происходит не резко, как у мягких сверхпроводников, а на протяжении некоторого температурного интервала;
- Имеют тенденцию к рассеянию энергии при пропускании через них переменного тока;
- Зависимость свойств сверхпроводимости от технологических режимов изготовления, чистоты материала и совершенства его кристаллической структуры.

По технологическим свойствам твердые сверхпроводники делят на следующие виды:

- Сравнительно легко деформируемые, из которых можно изготавливать проволоку и ленты (ниобий, сплавы ниобий – титан Nb – Ti, ванадий - галлий V – Ga);
- Трудно поддающиеся деформации из-за хрупкости, из которых получают изделия методами порошковой металлургии (интерметаллические материалы типа станнида ниобия Nb₃Sn).

В области исследования явления сверхпроводимости в конце 20 века было сделано ещё одно открытие. Группа исследователей из Японии сообщила о переходе твердого кислорода в сверхпроводящее состояние при $T_{кр} = 0,6$ К под давлением свыше 100 ГПа. Эксперимент проводился в миниатюрной установке с алмазными наковальнями. Камера высокого давления с образцом кислорода имела диаметр всего 50мкм (порядка толщины человеческого волоса). Тем не менее к образцу были подведены четыре платиновых электроды для проведения четырех контактных измерений сопротивления, а прозрачная алмазная наковальня позволяла проследить процесс металлизации по изменению коэффициента отражения видимого света.

Часто сверхпроводниковые провода покрывают «стабилизирующей» оболочкой из меди или другого хорошо проводящего электрический ток и тепло металла, что дает возможность избежать повреждения

основного материала сверхпроводника при случайном повышении температуры.

Сверхпроводники используют при создании: электрических машин и трансформаторов малых массы и размеров с высоким коэффициентом полезного действия; кабельных линий для передачи энергии большой мощности на большие расстояния; накопителей энергии и устройств памяти. На основе пленочных сверхпроводников создан ряд запоминающих устройств и элементов автоматики и вычислительной техники.

Криопроводники. Некоторые металлы могут достигать при низких (криогенных) температурах весьма малого значения удельного электрического сопротивления ρ , которое в сотни и тысячи раз меньше, чем удельное электрическое сопротивление при нормальной температуре. Материалы, обладающие такими свойствами, называют криопроводниками (гиперпроводниками). В качестве криопроводников используют медь, алюминий, серебро, золото.

Например, бериллий при температуре сжижения азота (77,4 К) обладает в 3,5 раза более высокой удельной проводимостью, чем у меди, в 5 раз – чем у алюминия, и в 18 раз – чем у натрия.

Плотность тока в криопроводниках при рабочих температурах в тысячи раз превышает плотность тока в них при нормальной температуре, что определяет их использование в сильноточных

электротехнических устройствах, к которым предъявляются высокие требования по надежности и взрывобезопасности.

Применение криопроводников имеет существенное преимущество по сравнению со сверхпроводниками. Если в сверхпроводниковых устройствах в качестве охлаждающего вещества применяют жидкий гелий, работа криопроводников обеспечивается благодаря более высококипящим и дешевым хладагентам – жидкому водороду или даже жидкому азоту. Это упрощает и удешевляет производство и эксплуатацию устройства.

5. Материалы с высоким сопротивлением.

В качестве материалов с высоким сопротивлением используют металлические сплавы типа твердых растворов замещения, металлические и угольные пленки, проводниковые композиции.

Металлы высокого сопротивления по назначению можно разделить на проводниковые резистивные материалы, пленочные резистивные материалы, материалы для термопар.

5.1. Проводниковые резистивные материалы.

Проводниковые резистивные материалы разделяют на сплавы для проволочных резисторов (манганин, константан) и для электронагревательных элементов (нихром, фехраль, хромаль).

К проволочным резистивным материалам предъявляются следующие требования:

- Удельное электрическое сопротивление ρ при нормальной температуре не менее $0,3 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ и высокая стабильность его значения во времени.
- Малый температурный коэффициент удельного электрического сопротивления $\text{TK}\rho$.
- Малый температурный коэффициент термоЭДС в паре сплава с медью.
- Технологичность.

В отличие от материалов с высокой проводимостью (чистых металлов) резистивные материалы представляют собой в основном сплавы с заметно деформированной кристаллической решеткой. Для получения проволоки разного диаметра, применяемой для изготовления проволочных резисторов различного назначения, наибольшее распространение получили сплавы на основе меди и никеля. Важнейшие электрические характеристики этих сплавов зависят от процентного соотношения меди и никеля.

Манганин – сравнительно пластичный сплав, получивший свое название из-за содержания в нем марганца. Его примерный состав: медь Cu – 85%, марганец Mn – 12%, никель Ni – 3%.

Таблица 5.1.1. Основные свойства проводниковых сплавов с высоким сопротивлением.

Параметр.	Манганин	Константан	Нихром
Плотность D , кг/м ³	8400	8900	8200...8300
Удельное электрическое сопротивление ρ , мкОм*м	0,42...0,48	0,48...0,52	1,1...1,2
Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления ТК ρ , К ⁻¹	(6...50)* 10 ⁻⁶	-(5...25)* 10 ⁻⁶	(100...200)* 10 ⁻⁶
Коэффициент термоЭДС в паре с медью, мкВ/К	1...2	45...55	-
Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	450...600	-	650...700
Относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$, %	15...30	20...40	25...30
Рабочая температура $T_{\text{раб}}$, °С	200	400	1000

Для обеспечения малого значения температурного коэффициента удельного электрического сопротивления ТК ρ и стабильности коэффициента удельного электрического сопротивления ρ манганин подвергают отжигу в вакууме при температуре примерно 550...600 °С в течении 10 ч с последующим медленным охлаждением. После прокатки и волочения из манганина можно получить проволоку диаметром до 0,02 мм. При температуре 60 °С манганиновая проволока начинает окисляться, поэтому ее применяют в стеклянной изоляции, которая отличается высокими электроизоляционными свойствами, повышенной нагрево- и влагостойкостью. Недостатком манганинового микропровода является пониженная гибкость из-за хрупкости стеклянной изоляции.

Константан представляет собой твердый раствор никеля и меди, получивший свое название за высокое постоянство коэффициента удельного электрического сопротивления ρ (константа) при изменении температуры. Вредной примесью для константана является сера S, присутствие которой способствует развитию межкристаллитной коррозии. Для устранения вредного воздействия серы в состав сплава вводят марганец. Ориентировочный состав константана: медь Cu – 58,5%, никель Ni – 40%, марганец Mn – 1,5%.

Нагревостойкость константана выше, чем манганина, предельно допустимая температура при длительной работе достигает 500°C . При нагревании до высоких температур (примерно 900°C) константан окисляется с образованием оксидной изолирующей пленки. Это позволяет применять константан для изготовления реостатов, резисторов и электронагревательных элементов без специальной межвитковой изоляции. Широкому применению константана препятствует его повышенная стоимость из-за большого содержания в нем дефицитного никеля.

К сплавам для электронагревательных элементов предъявляются следующие требования:

- Высокий коэффициент удельного электрического сопротивления ρ .
- Малый температурный коэффициент удельного электрического сопротивления $\text{TK}\rho$.

- Длительная работа на воздухе при высоких температурах (до 1000 °С и выше).
- Технологичность.
- Невысокая стоимость и доступность компонентов.

К нагревостойким сплавам относят сплавы на основе железа, никеля, хрома и алюминия. Высокая нагревостойкость этих сплавов достигается благодаря введению в их состав достаточно большого количества металлов, которые образуют при нагреве на воздухе сплошную оксидную пленку.

Нихромы представляют собой твердые растворы никель – хром (Ni - Cr) или тройные сплавы никель – хром – железо (Ni – Cr - Fe).

Железо вводится в сплав для обеспечения лучшей обрабатываемости и снижения стоимости, но в отличие от никеля и хрома железо легко окисляется, что приводит к снижению нагревостойкости сплав; содержание хрома придает высокую тугоплавкость оксидам. Для увеличения срока службы трубчатых нагревательных элементов нихромовую проволоку помещают в трубки из стойкого к окислению металла и заполняют их диэлектрическим порошком с высокой теплопроводностью (магнезий Mg). Такие нагревательные элементы применяют, например, в электрических кипятильниках, которые могут работать длительное время.

Нихромовая проволока применяется для изготовления проволочных резисторов, потенциометров, паяльников, электропечей и

пленочных резисторов интегральных микросхем.

Как и константаны, нихромы содержат большое количество дорогого дефицитного никеля.

Хромоалюминиевые сплавы *фехрал* и *хромаль* намного дешевле нихромов, так как хром и алюминий сравнительно дешевле и менее дефицитны. Однако они менее технологичны, более тверды и хрупкие. Из них получают проволоку большого диаметра и ленты с большим поперечным сечением, поэтому их используют в электронагревательных устройствах большой мощности и промышленных электрических печах.

5.2. Пленочные резистивные материалы.

Пленочные резистивные материалы получают из исходных материалов в процессе получения самих резистивных пленок. Свойства таких резистивных пленок значительно отличаются от свойств исходных материалов. Тонкие резистивные пленки наносят на изоляционные основания (подложки) методом термического испарения в вакууме; катодным, реактивным и ионоплазменным распылением, электрохимическим и химическим осаждением. В качестве оснований используют стекло, керамику, ситалл, поликор, слоистые пластинки.

К материалам, применяемым для изготовления пленочных резисторов, предъявляются следующие требования:

- Возможность изготовления стабильных во времени резисторов с низким температурным коэффициентом удельного электрического

сопротивления $TK\rho$.

- Хорошая адгезия к подложкам.
- Высокая коррозионная стойкость.
- Устойчивость к длительному воздействию высокой температуры.

В зависимости от исходных материалов пленочные резисторы разделяют на металлопленочные и металлооксидные, композиционные, углеродистые.

Для изготовления металлопленочных и металлооксидных резисторов применяют тугоплавкие металлы тантал, титан, никель, хром, палладий, рений, вольфрам и сплавы на их основе.

Металлопленочные резисторы обладают следующими свойствами:

- Толщина тонких резистивных пленок 1...10 мкм.
- Повышенные значения удельного температурного коэффициента поверхностного электрического сопротивления $TK\rho_s$.
- Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления $TK\rho$ пленок толщиной менее нескольких нанометров отрицателен.
- Мелкозернистая структура.
- Удельное объемное сопротивление пленок зависит от толщины и больше, чем у исходных материалов.

Металлооксидные материалы образуют резистивные пленки, которые обладают высокой термостойкостью. Наиболее широкое применение для изготовления таких резистивных пленок получили материалы на основе двуокиси олова (SnO_2). Пленки двуокиси олова обладают хорошей адгезией к изоляционным подложкам и высокой кислотостойкостью.

Композиционные резистивные материалы представляют собой механические смеси мелкозернистых порошков металлов и их соединений с органической и неорганической связкой. В качестве проводящей фазы используют проводники (порошки серебра, палладия) и полупроводники (оксиды серебра, палладия, карбиды кремния, вольфрама). В качестве связующих веществ применяют термопластичные и термореактивные полимеры, порошкообразное стекло, неорганические эмали.

Композиции, содержащие органические связующие вещества, образуют композиционные резистивные пленки, которые подвержены действию влаги и повышенной температуры. Предельная рабочая температура композиционных резистивных пленок не выше 150°C .

Композиции с неорганическими связующими элементами после спекания при высоких температурах образуют композиционные резистивные пленки с высокой влаго- и теплостойкостью до температуры 350°C .

Однако верхний предел сопротивлений резисторов снижается, увеличивается нелинейность и собственные шумы.

К недостаткам композиционных резистивных пленок относятся повышенный уровень собственных шумов, зависимость сопротивления от частоты и старение при длительной нагрузке.

Углеродистые материалы используют в качестве пленочного резистивного материала в виде проводящих модификаций углерода: природного графита, сажи, пиролитического углерода. Пиролитический углерод получают разложением углеводородов при высокой температуре в вакууме или среде инертного газа.

Пиролитические резистивные пленки углерода обладают следующими свойствами:

- Толщина не более 6...10 см.
- Высокая стабильность параметров.
- Устойчивость к импульсным перегрузкам.
- Низкий уровень шумов.
- Отрицательный температурный коэффициент удельного электрического сопротивления TK_{ρ} .
- Малая зависимость электрического сопротивления от приложенного напряжения и частоты.
- Относительно низкая себестоимость.

5.3. Материалы для термопар.

Для термопар применяют чистые металлы и различные сплавы с высоким электрическим сопротивлением.

Материалы для термопар выбирают по следующим характеристикам:

- Допустимая рабочая температура спая $T_{\text{сп}}$.
- Удельный коэффициент электрического сопротивления ρ .
- Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления $TK\rho$.
- Коэффициент термоЭДС.

Для изготовления термопар чаще всего используют сплавы, приведенные в таблице 6.3.1.

Таблица 5.3.1. Характеристика сплавов для изготовления термопар.

Параметр.	Копель	Хромель	Платинороди й	Алюмел ь
Состав сплава	44% Ni; 56% Cu	90% Ni; 10% Cr	90% Rt; 10% Rh	95% Ni; 5% Al, Si, Rh
Удельный коэффициент электрического сопротивления ρ , мкОм*м	0,465	0,66	0,19	0,305

Термопары могут применяться для измерения следующих температур: до 350°C – медь – константан, медь – копель; до 600°C – железо – константан, железо – копель, хромель – копель; до $900...1000^{\circ}\text{C}$ – хромель – алюмель; до 1600°C – платинородий – платина. Для измерения криогенных температур можно использовать термопару железо – золото.

6. Проводниковые материалы и сплавы различного применения.

6.1. Благородные металлы.

Группу благородных металлов (серебро Ag, золото Au, платина Pt, палладий Pd) составляют металлы, обладающие наибольшей химической стойкостью к условиям окружающей среды.

Таблица 6.1.1. Основные свойства благородных металлов.

Параметр	Ag	Pd	Au	Pt
Плотность D , кг/м ³	10490	12200	19320	21400
Температура плавления $T_{пл}$, °C	960,8	1554,5	1063,0	1773,0
Удельное электр. сопротивление ρ , мкОм*м	0,016	0,011	0,024	0,105
Температурный коэффициент: Удельного электр. Сопротивления TK_{ρ} , K ⁻¹	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$3,98 \cdot 10^{-3}$
линейного расширения TK_l , K ⁻¹	$19 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$14 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$

Серебро – белый блестящий металл, его используют в производстве конденсаторов в чистом виде и сплавах, в виде покрытий в ответственных ВЧ и СВЧ устройствах. Оно входит в состав тугоплавких ответственных припоев.

Платина – светло-серый металл, используется как материал для сеток в мощных генераторных лампах, для особо тонких нитей (диаметр примерно 1 мкм).

Палладий – белый пластичный металл, по многим свойствам близкий к платине, в ряде случаев служит его заменителем. Палладий и его сплавы с серебром и медью применяют в качестве контактных материалов. Благодаря высокой проницаемости для водорода его применяют для очистки водорода.

Золото – металл желтоватого цвета. Золото в чистом виде и в виде сплавов с платиной, серебром, никелем, цирконием применяют для вакуумного напыления тонких пленок полупроводниковых и гибридно-пленочных интегральных микросхем, золочения контактных поверхностей электронных ламп СВЧ, корпусов микросхем.

6.2. Тугоплавкие металлы.

К тугоплавким металлам относят металлы с температурой плавления более 1700°C . Эти металлы устойчивы при низких температурах, но при повышенных температурах активно взаимодействуют с атмосферой. Поэтому изделия из них эксплуатируют в вакууме или среде инертных газов (аргон Ar, азот N_2 и другие).

Таблица 6.2.1. Основные свойства тугоплавких металлов.

Параметр.	Ti	Zr	Mo	Ta	W
Плотность D , кг/м^3	4500	6500	10200	16600	19300
Температура плавления $T_{\text{пл}}$, $^{\circ}\text{C}$	1680	1860	2620	29700	3380
Удельное электр. сопротивление ρ , $\text{мкОм}\cdot\text{м}$	0,42	0,41	0,057	0,135	0,055
Температурный коэффициент: Удельного электр. сопротивления TK_{ρ} , K^{-1}	$44 \cdot 10^{-4}$	$45 \cdot 10^{-4}$	$46 \cdot 10^{-4}$	$38 \cdot 10^{-4}$	$46 \cdot 10^{-4}$
Линейного расширения TK_l , K^{-1}	$8 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$

Вольфрам – светло-серый металл, который применяют для изготовления нитей накала осветительных ламп, катодов прямого и косвенного

накала генераторных ламп, рентгеновских трубок.

Молибден — близкий по своим свойствам к вольфраму металл, но почти в 2 раза легче последнего. Молибден применяют для изготовления анодов и сеток генераторных ламп, крючков для поддержания вольфрамовых нитей, теплоотводов в корпусах мощных ВЧ и СВЧ полупроводниковых приборов.

Тантал — серовато-белый сверхпроводниковый металл. Его применяют в качестве различных нагревателей и испарителей, используемых в технологии вакуумного нанесения тонких пленок.

Титан применяется для порошкообразных покрытий молибденовых и вольфрамовых электродов электровакуумных приборов, работающих при высоких температурах. Титановые сплавы образуются в результате легирования титана алюминием, железом, хромом, марганцем, оловом и обладает следующими свойствами: низкая плотность, высокая коррозионная стойкость, прочность, жароупорность и т.д.

Цирконий — металл, который в слитках похож на сталь, хорошо куется. Высокая концентрация циркониевой пыли в воздухе пожароопасна, т.к. порошкообразный цирконий при температуре выше 75 °C легко воспламеняется. Тугоплавкие соединения циркония, обладающие высокой электропроводностью, применяют для изготовления анодов и сеток электронных приборов.

7. Проводимость полупроводниковых материалов.

7.1. Особенности полупроводников.

Полупроводниковые материалы обладают проводимостью, которой можно управлять, изменяя напряжение, температуру, освещенность и другие факторы. Одной из особенностей полупроводниковых материалов является их поведение при изменении температуры. У полупроводников при уменьшении температуры их удельная электрическая проводимость уменьшается, а при стремлении температуры к 0 К полупроводники прекращают проводить электрический ток и переходят в разряд диэлектриков. При повышении температуры удельная проводимость γ резко увеличивается. Поведение полупроводников также зависит от его внутренней структуры. Для появления свободных носителей заряда в полупроводниковом материале требуется внешняя энергия (тепловая, механическая нагрузка, облучение ядерными частицами, электрические и магнитные поля и т.д.). Если носители заряда появились под действием тепла, то они называются *равновесными*. В результате воздействия на полупроводник других видов энергии образуются дополнительные неравновесные носители зарядов.

7.2. Собственная проводимость.

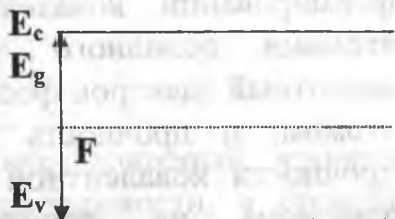
Собственная проводимость полупроводников может быть рассмотрена на примере кремния, который является элементом IV группы

Периодической системы химических элементов. Эти элементы образуют алмазоподобную модификацию гранецентрированной кубической решетки, в которой каждый атом, расположенный в узле кристаллической решетки, окружен четырьмя другими атомами и связан с ними ковалентной связью. Так как при ковалентной связи каждый внешний электрон принадлежит одновременно двум атомам, то внешние оболочки атомов содержат по восемь электронов. Для того чтобы электрон превратился в свободный носитель заряда, необходимо сообщить ему дополнительную энергию, достаточную для разрыва ковалентной связи. Такая энергия определяется шириной запретной зоны и называется *энергией активации*. При разрыве ковалентной связи освободившийся электрон под действием тепловой энергии хаотически движется по объему полупроводника. На месте оторвавшегося электрона остается положительно заряженная незаполненная связь с зарядом, который равен заряду электрона, называемая *дыркой*. Проводимость полупроводника, которая возникает в результате разрыва собственных ковалентных связей, называется *собственной*. Собственная электропроводность полупроводника γ складывается из электронной электропроводности γ_n и дырочной электропроводности γ_p :

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_p$$

Энергетическая зонная диаграмма полупроводника с собственной проводимостью.

Электронны внешней оболочки атома заполняют ряд энергетических уровней, составляющих валентную зону E_v . Валентные электроны имеют маленькие энергии. В полупроводниках имеется большое число электронов, находящихся на более высоких уровнях. Эти уровни составляют зону проводимости E_c . Именно электроны проводимости обеспечивают электропроводность материала. E_g – запретная зона, соответствующая уровням энергии, которыми электроны обладать на могут. F - уровень Ферми располагается посередине между валентной зоной и зоной проводимости. Вероятность нахождения частиц на уровне Ферми равна 50%.



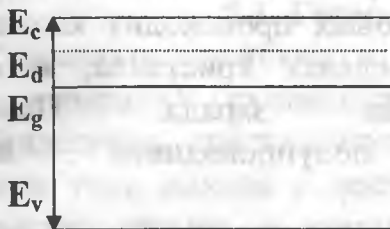
7.3. Примесная проводимость.

Примесная проводимость полупроводников обусловлена несовершенством кристаллической структуры полупроводника. Дефекты в кристаллической решетке вызывают образование дополнительных энергетических уровней внутри запретной зоны. Различают 2 вида примесей: донорная и акцепторная.

Донорная примесь. Если в кристаллической решетке кремния находится атом примеси, который

представляет собой элемент V группы Периодической системы, то четыре из пяти валентных электронов фосфора будут участвовать в формировании ковалентных связей с соседними атомами основного элемента кремния. Пятый валентный электрон фосфора связан только со своим атомом, и прочность этой связи много меньше прочности ковалентной связи. Для перехода этого электрона на дополнительный энергетический уровень требуется энергия, много меньше энергии ширины запрещенной зоны. Оторвавшийся от атома фосфора пятый электрон превращается в электрон проводимости. На месте оторвавшегося электрона образуется дырка, которую не могут заполнить электроны других атомов фосфора, так как концентрация его в кремнии очень мала и его атомы расположены далеко друг от друга. Дырка остается неподвижной, дырочная проводимость в таком полупроводнике отсутствует и его проводимость носит электронный характер. Полупроводники с преобладанием электронной электропроводности называются *электронными* или *n – типа* (*n – negative – отрицательный*). Электроны в полупроводнике *n – типа* называют *основными носителями заряда*, а дырки – *неосновными носителями*. Дефекты, которые вызывают появление в полупроводнике дополнительных свободных электронов, называют донорами, а электропроводность, обусловленную донорной примесью, называют *электронной*.

полупроводника с донорной примесью.



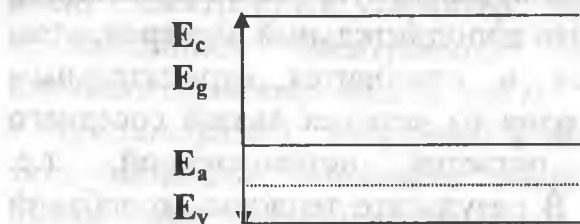
В таком полупроводнике донорный уровень находится ближе к зоне проводимости, а уровень Ферми располагается между зоной проводимости и донорным уровнем.

Акцепторная примесь. Если в кристаллической решетке кремния находится атом примеси, который представляет собой элемент III группы Таблицы Д.И. Менделеева, например бора, то все три валентных электрона бора участвуют в образовании ковалентных связей с кремнием. А одна связь кремния остается незаполненной. Эту связь можно заполнить электроном соседнего атома кремния, образовав четвертую ковалентную связь с примесным атомом бора. Приняв дополнительный электрон, атом бора ионизируется и становится отрицательным ионом. При этом одна из четырех связей соседнего атома кремния остается незаполненной, т.е. образуется дырка. В результате тепловых колебаний решетки эта незавершенная связь может быть заполнена электроном соседнего атома, образуя новую дырку.

Таким образом, в результате исчезновения одних дырок и образования новых происходит хаотичное движение дырок в пределах кристалла, которые являются носителями заряда. Поэтому электропроводность полупроводника носит дырочный характер.

Дефекты, которые вызывают появление в полупроводнике дополнительных дырок проводимости, называют акцепторными, а электропроводность, обусловленную акцепторной примесью, - дырочной. Полупроводники с преобладанием дырочной электропроводности называют дырочными *p* - типа (*p* - positive - положительный). В полупроводнике *p* - типа основными носителями заряда являются дырки, а неосновными - электроны.

Энергетическая зонная диаграмма полупроводника с акцепторной примесью.



В таком полупроводнике акцепторный уровень находится ближе к валентной зоне, а уровень Ферми располагается между валентной зоной и акцепторным уровнем.

8. Простые полупроводники.

8.1. Германий.

Основные свойства и соединения. Германий (Ge) – элемент IV группы Периодической системы Д. И. Менделеева, кристаллизуется в виде кубической решетки типа алмаза с постоянной $a = 0,357$ нм; количество атомов в единице объема составляет $4,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре составляет 0,75 эВ. Следовательно, рабочая температура полупроводниковых приборов на основе германия не превышает 80°C . Концентрация собственных носителей заряда $2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, собственное удельное сопротивление 0,68 Ом*м. Подвижность носителей заряда в слаболегированном германии при комнатной температуре сравнительно высока и составляет $0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для электронов и $0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для дырок. Это позволяет использовать германий для создания высокочастотных диодов и транзисторов.

При низких температурах ($T < 5,4 \text{ К}$) и высоких давлениях ($p > 11 \text{ ГПа}$) германий переходит в сверхпроводящее состояние. Для видимого света германий не прозрачен, для инфракрасных лучей относительно прозрачен при длине волны более 1,8 мкм.

Кристаллический германий представляет собой твердый и хрупкий материал с характерным металлическим блеском и плотностью 5360 кг/м^3 . Температура плавления германия составляет 937°C .

На воздухе кристаллический германий устойчив до температуры 600°C , выше которой он окисляется до двуокиси германия GeO_2 . Германий хорошо растворяется в смеси соляной и азотной кислот, перекиси водорода, в кипящих щелочах. Германий не растворяет углерод даже при очень высоких температурах, при температуре плавления растворимость углерода в германии составляет примерно 10^8 см^{-3} . С кварцем германий не взаимодействует даже при нагревании до температуры 1500°C , поэтому в полупроводниковом производстве широко используют графит и кварц для изготовления разнообразной технологической тары. С галогенами и серой германий бурно реагирует при высокой температуре.

Основные соединения германия. Основными соединениями германия являются моноокись, двуокись и тетрахлорид германия.

Моноокись германия GeO – неустойчивое двухвалентное соединение с аморфной структурой – образуется в процессе восстановления двуокиси германия. В некоторых случаях она образуется в растворах. Моноокись германия обладает следующими свойствами:

- Плотность $D = 4,4 \text{ г/см}^3$;
- При нагревании на воздухе, начиная с температуры 600°C , диспропорционирует на элементарный германий и его двуокись;
- В воде не растворяется;

- В серной и соляной кислоте растворяется медленно.

Двуокись германия GeO_2 - аморфное, кристаллическое вещество. Аморфную (стеклообразную) модификацию с плотностью $D = 3,66 \text{ г/см}^3$ получают быстрым охлаждением расплавленной двуокиси германия. Двуокись германия обладает следующими свойствами:

- Плотность жидкой двуокиси германия при температуре 1200°C составляет $D = 3,39 \text{ г/см}^3$, а при температуре 1400°C $D = 3,29 \text{ г/см}^3$;
- Растворимость в воде является препятствием для использования двуокиси германия в качестве защитной пленки, а германия – для производства интегральных микросхем по планарной технологии;
- Растворяется в соляной и серной кислотах, а также в щелочах.

Двуокись германия – порошок белого цвета используют для получения поликристаллического и монокристаллического германия. Содержание примесей (алюминия, железе, кремния, магния, мышьяка) не превышает $10^{-5}\%$, хлора – $0,3\%$, влаги – 4% .

Получение и очистка германия. Германий относится к рассеяным в природе элементам. Он встречается часто, но в весьма малых количествах. Присутствие германия обнаружено в цинковых рудах и в золах разных углей.

Основным источником получения германия является зола углей и отходы металлургических заводов.

Получают германий в результате сложного технологического процесса из продуктов сгорания бурого угля. Технологический процесс получения монокристаллического германия состоит из следующих основных процессов.

- В результате хлорирования и солянокислотной обработки германиевых продуктов образуется тетрахлорид германия.
- После очистки тетрахлорид германия дальнейшим окислением переводят в двуокись германия, которая представляет собой порошок белого цвета.
- Двуокись германия восстанавливают в среде водорода при температуре $600 - 700^{\circ}\text{C}$ до элементарного поликристаллического германия в виде порошка серого цвета.
- Получение поликристаллического слитка и его очистка от примесей зонной плавкой. Содержание примесей в поликристаллическом германии велико, поэтому он не пригоден для непосредственного употребления в полупроводниковом производстве; германий с собственной проводимостью должен содержать примесей до $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.
- Выращивание из расплавленного поликристаллического германия слитка

монокристалла германия, для получения монокристаллического германия используют метод зонной плавки и вытягивание из расплава.

Легирующие элементы. Легирующие примеси в германии делят на нейтральный, акцепторные, донорные и создающие глубокие энергетические уровни. К нейтральным примесям относятся инертные газы, азот и элементы IV группы: кремний, свинец, олово. Основными акцепторными примесями в германии являются элементы III группы: галлий, индий, алюминий. Для создания донорных уровней в германии используют элементы V группы: мышьяк, сурьму, висмут, фосфор, а также элемент I группы – литий. Глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне германия образуют многие элементы I, II, VI, VII и VIII групп Периодической системы элементов Менделеева, но растворимость этих элементов в германии, как правило, значительно меньше растворимости доноров и акцепторов. Промышленность выпускает много различных марок германия с электронным и дырочным типом электропроводности, легированных различными примесями с величиной удельного сопротивления 0,0001 – 45 Ом*см.

8.2. Кремний.

Основные свойства кремния. Кремний (Si) - элемент IV группы Периодической системы Д. И. Менделеева, кристаллизуется в виде кубической решетки типа алмаза, в которой все атомы расположены на одинаковом расстоянии друг от

друга; постоянная решетки $a = 0,357$ нм. Число атомов кремния в единице объема равно $5 \cdot 10^{28}$ в 1 м^3 . На внешней валентной оболочке атома кремния расположено 4 электрона.

Основной параметр полупроводниковых материалов – ширина запрещенной зоны для кремния при температуре 20°C составляет 1,12 эВ. Это позволяет создавать кремниевые полупроводниковые приборы с относительно высокой рабочей температурой до 125°C . Концентрация собственных носителей заряда при комнатной температуре $3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$; удельное сопротивление кремния с собственной электропроводностью около $2,3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и резко уменьшается при увеличении концентрации примесей. При низких температурах ($T < 6,7 \text{ К}$) и высоких давлениях ($p > 12 \text{ ГПа}$) кремний переходит в сверхпроводящее состояние.

Кремний не прозрачен для видимого света, но для инфракрасных лучей с длиной волны более 1,2 мкм чистый кремний становится прозрачным. Наличие примесей ведет к увеличению коэффициента поглощения электромагнитного излучения.

Внешне кремний представляет собой темно-серый материал с металлическим блеском, довольно твердый и хрупкий. Плотность кремния 2320 кг/м^3 , температура плавления 1414°C .

В чистых кислотах кремний не растворяется, но легко растворяется в смеси азотной и плавиковой кислот, а также в щелочах. При нагревании активность кремния резко возрастает.

При температурах выше 200°C он соединяется с галогенами, образуя галогениды (SiCl_4 , SiI_4). При температурах выше 900°C кремний окисляется до оксида кремния (IV), т. е. двуокиси кремния SiO_2 . При температурах $1100 - 1300^{\circ}\text{C}$ кремний взаимодействует с азотом и углеродом, образуя соответственно нитрид кремния Si_3N_4 и карбид кремния SiC .

Основные соединения кремния. В качестве промежуточного продукта при получении поликристаллического кремния используют *тетрахлорид кремния* SiCl_4 , представляющий собой прозрачную бесцветную жидкость, дымящуюся на воздухе. Для получения чистого кремния используют также *моносилан кремния* SiH_4 - бесцветный газ и *трихлорсилан кремния* SiHCl_3 - прозрачную бесцветную жидкость. Эти два соединения кремния взрывоопасны.

Двуокись кремния SiO_2 является важнейшим соединением кремния. Ее отличают высокая температура плавления (1723°C) и очень низкая химическая активность. Растворяется SiO_2 только в плавиковой кислоте и щелочах.

Двуокись кремния широко применяют в полупроводниковом производстве в виде тонких пленок, получаемых на поверхности кремниевых пластин в результате термического окисления. К таким пленкам предъявляют очень жесткие требования.

Они должны, во-первых, защитить поверхность кремния от воздействия окружающие и технологической сред (воздуха, различных газов, влаги). Во-вторых, они играют роль маски, предотвращая проникновение легирующих примесей к поверхности кремния при диффузии. В-третьих, такие защитные пленки используют в качестве диэлектрика для изоляции элементов интегральных микросхем. Поэтому они должны обладать достаточной электрической прочностью, высоким удельным сопротивлением, малой диэлектрической проницаемостью. Кроме того, к защитным пленкам предъявляют требование технологичности, под которым понимают совместимость процессов получения пленки и изготовления интегральных микросхем. Всем этим требованиям в полной мере отвечают пленки SiO_2 , поэтому в производстве интегральных микросхем используют только кремний, а не, например, германий.

Получение и очистка кремния. Кремний широко распространен в природе. Земная кора содержит более 50 % кремнезема SiO_2 , который служит основным сырьем для получения технических сортов кремния. Основными способами получения поликристаллического кремния являются восстановление тетрахлорида кремния парами водорода и термическое разложение моносилана SiO_4 . Полученный поликристаллический кремний содержит 1 – 5 % примесей, что, конечно, слишком

много для непосредственного использования в полупроводниковом производстве.

Для получения объемных кристаллов используют три основных метода: метод бестигельной зонной плавки, метод вытягивания из расплава и метод гарниссажной плавки.

Легирующие элементы. В полупроводниковом производстве чистый монокристаллический кремний применяют редко. Действие большинства полупроводниковых приборов основано на использовании примесной электропроводности. Для придания кремнию примесной электропроводности в него вводят строго контролируемое количество необходимой примеси. В зависимости от характера влияния примеси на тип электропроводности все примесные элементы можно разделить на нейтральные, акцепторные и создающие в запрещенной зоне кремния глубокие энергетические уровни.

Нейтральные примеси не меняют тип электропроводности кремния и количество носителей заряда в нем. К ним относят водород, азот, инертные газы, а также элементы IV группы периодической системы элементов (германий, олово, свинец).

Основными акцепторными примесями для кремния являются элементы III группы таблицы Д. И. Менделеева, прежде всего бор и алюминий. Реже используют галлий, индий и таллий. Основными донорными примесями являются элементы V группы: фосфор, мышьяк, сурьма, висмут.

Элементы I, II, VI, VII групп создают в кремнии глубокие энергетические уровни и могут играть роль как доноров, так и акцепторов. Из них наиболее часто используют цинк и золото. Легирование золотом создает в кремнии дополнительные центры рекомбинации носителей заряда, что уменьшает эффективное время жизни неравновесных носителей заряда.

9. Сложные полупроводники.

Простые полупроводники не всегда отвечают требованиям современного производства полупроводниковых приборов. Для создания материалов с различными свойствами широко используют сложные неорганические и органические полупроводниковые соединения.

Структура сложных полупроводников образована атомами различных химических элементов. К этой группе относят твердые растворы и химические соединения типа $A^m_x B^n_y$, где верхние индексы m и n обозначают номер группы Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, а нижние x и y – число атомов этого элемента в соединении.

Наиболее широкое применение нашли неорганические кристаллические полупроводники.

9.1. Сложные полупроводники типа $A^{IV}B^{IV}$.

Единственным двойным соединением элементов IV группы Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева является соединение кремния с углеродом – карбид кремния SiC .

Карбид кремния в природе встречается крайне редко в ограниченных количествах.

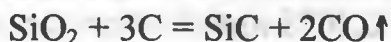
Карбид кремния может кристаллизироваться в двух аллотропических формах. При температуре менее $2000^{\circ}C$ карбид кремния кристаллизуется в кубической модификации (β - SiC), при более высоких температурах образуется гексагональная кристаллическая решетка, или α - SiC . Гексагональная модификация имеет много разновидностей, так называемых политипов. У всех политипов постоянная решетки $a = 0,3078$ нм.

Карбид кремния обладает очень высокой химической стойкостью. При комнатной температуре он вступает в реакцию только с расплавленной ортофосфорной кислотой и смесью азотной и плавиковой кислот, а так же с расплавленными щелочами, которые используют в качестве травителей. Для этой же цели используют расплавы солей Na_2CO_3 и K_2CO_3 , а также Na_2O_2 . При температуре около $100^{\circ}C$ карбид кремния реагирует с хлором. Окисление карбида кремния происходит только при температуре более $800^{\circ}C$.

Карбид кремния имеет довольно сложную структуру энергетических зон.

Для различных политипов α -модификации $E_g = 2,72 - 3,34$ эВ, а для β -SiC $E_g = 2,39$ эВ. Такое большое значение E_g позволяет создавать на основе карбида кремния полупроводниковые приборы, которые сохраняют работоспособность при температурах до $400 - 500$ °С. Собственная электропроводность карбида кремния из-за большой ширина запрещенной зоны наблюдается лишь при температурах более 1400 °С. Подвижность носителей заряда в карбиде кремния низкая [не превышает $0,1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для электронов и $0,02 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для дырок].

Поликристаллический карбид кремния получают в электрических печах восстановлением двуокиси кремния углеродом согласно уравнению



Поликристаллический карбид кремния используют для выращивания монокристаллов, а также для получения порошка SiC путем дробления.

Кристаллы чистого карбида кремния бесцветны. Наличие примесей окрашивает их в самые разнообразные цвета. Примеси элементов V группы (прежде всего азот), а также Li, O, являясь для карбида кремния донорами, придают ему электропроводность n — типа и окрашивают его в светло-зеленый цвет. Акцепторными примесями для карбида кремния являются элементы III группы периодической системы (B, Al, Sc, Ga) и II группы (Be, Mg, Ca).

Кристаллы карбида кремния с электропроводностью p – типа имеют голубую и черную окраску.

Важнейшим и широко используемым свойством карбида кремния является его способность к люминесценции в видимой части спектра.

Карбид кремния благодаря высокой твердости используют для механической обработки различных материалов. Из смеси порошка карбида кремния, элементарного кремния и углерода обжигом в атмосфере азота получают силит, который применяют для изготовления высокотемпературных нагревателей. Карбид кремния применяют также для серийного выпуска вариаторов (нелинейных сопротивлений), световодов, выпрямительных и туннельных диодов.

На основе карбида кремния получают различные материалы. Например, при обжиге карбида кремния с глинистой связкой получают нелинейный материал тирит, а при обжиге его с ультрафарфоровой связкой получают нелинейный материал лэтин.

9.2. Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$.

Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$ представляют собой химические соединения металлов III группы периодической системы (Al, Ga, In, B) с элементами V группы (P, As, Sb, N).

Обладая широким спектром различных электрофизических свойств, большой химической

стойкостью и механической прочностью, соединения $A^{III}B^V$ позволяет выбрать среди них материалы с необходимыми свойствами.

Наиболее широкое применение в полупроводниковом производстве нашли соединения мышьяка – арсениды галлия GaAs и индия InAs, соединения сурьмы – антимониды индия InSb и галлия GaSb и соединение фосфора – фосфид галлия GaP.

Основные свойства соединений $A^{III}B^V$. Все перечисленные соединения $A^{III}B^V$ являются кристаллическими веществами со структурой типа цинковой обманки или сфалерита. Такая структура аналогична кристаллической решетке кремния и германия, в которой каждый атом связан с 4 другими атомами ковалентными связями. Отличие состоит в том, что в узлах кристаллической решетки соединений $A^{III}B^V$ находятся не нейтральные атомы, а поочередно расположенные положительно заряженные ионы B^V и отрицательно заряженные ионы A^{III} .

Такая кристаллическая структура образуется за счет того, что один из 5 валентных электронов атома B^V переходит к атому A^{III} . В результате 3 межатомные связи носят электронный характер, а 1 – ионный. В целом такой вид связи называют донорно-акцепторным.

Соединения $A^{III}B^V$ химически весьма устойчивы, при комнатной температуре не взаимодействуют с водой и кислородом воздуха.

Для их травления используют смеси азотной, плавиковой и уксусной кислот с различными добавками. Применяют также щелочные и пергидролевые травители.

Основные параметры соединений типа $A^{III}B^V$ приведены в таблице 9.2.1.

Температура плавления соединений $A^{III}B^V$ выше температуры плавления исходных элементов. Исключение составляет антимонид индия, температура плавления которого (536°C) лежит между температурами плавления индия (155°C) и сурьмы (630°C). Внутри каждой группы соединений (фосфидов, арсенидов, антимонидов) температура плавления уменьшается при увеличении суммарного атомного номера элементов.

Таблица 9.2.1. Основные параметры соединений типа $A^{III}B^V$

Соединение	Суммарный атомный номер	Плотность, кг/м^3	Постоянная решетки, нм	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	Ширина запретной зоны E_g	Подвижность, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	
						Электронов	дырок
AlP	28	2420	0,543	2000	2,42	0,008	0,003
GaP	46	4100	0,545	1467	2,25	0,019	0,012
InP	64	4740	0,587	1055	1,28	0,46	0,015
AlAs	46	3600	0,563	1700	2,16	0,028	-
GaAs	64	5400	0,565	1237	1,4	0,95	0,045
InAs	82	5680	0,605	943	0,36	3,3	0,046
AlSb	64	4150	0,614	1070	1,6	0,02	0,055
GaSb	82	5650	0,609	712	0,7	0,4	0,14
InSb	100	5780	0,648	536	0,18	7,8	0,075

Ширина запретной зоны E_g соединений $A^{III}B^V$ изменяется в широких пределах – от 0,18 эВ для антимонида индия до 2,45 эВ для фосфида алюминия. Как и температура плавления, внутри каждой группы соединений ширина запрещенной зоны уменьшается при увеличении суммарного атомного номера элементов. Используя соединения с широкой запрещенной зоной (GaAs, GaP), можно изготовить полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы) с рабочей температурой более 300 °С. На основе твердых растворов соединений $A^{III}B^V$ друг в друге получают полупроводниковые материалы с промежуточными значениями E_g .

Характерной особенностью соединений $A^{III}B^V$ является высокая подвижность в них электронов. Высокая подвижность носителей заряда позволяет создавать на основе соединений $A^{III}B^V$ высокочастотные полупроводниковые приборы: СВЧ-генераторы, детекторы микроволнового диапазона и др.

В зависимости от ширины запрещенной зоны материала эти явления наблюдаются в широком интервале длин волн, включая видимую и инфракрасную области спектра. На основе соединений $A^{III}B^V$ созданы самые разнообразные электронно-оптические приборы: фоторезисторы, светодиоды, лазеры, приемники инфракрасного излучения, фотоумножители, оптические фильтры и др.

Основные соединения $A^{III}B^V$. Арсенид галлия GaAs занимает среди соединений $A^{III}B^V$ особое место.

Он обладает следующими свойствами: кристаллизуется в структуру сфалерита; молекулярная масса $m = 164,63$; плотность $D = 5,4$ г/см³; плотность жидкого арсенида галлия $D = 5,9$ г/см³; ширина запрещенной зоны $E_g = 1,4$ эВ; подвижность электронов при температуре 300 К $\mu_n = 0.85$ м²/(В*с); показатель преломления 3,2; диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 11,1$; рабочая температура р-п-переходов, изготовленных на основе арсенида галлия, достигает 400 °С; при комнатной температуре не взаимодействует с водой; при нагревании до температуры 300 °С не окисляется кислородом воздуха; при комнатной температуре взаимодействует с кислотами с выделением сильно токсичного вещества арсина AsH₃.

Растворимость увеличивается в смесях кислот: при комнатной температуре растворимость арсенида галлия в растворах соляной кислоты в широком диапазоне концентрации составляет $2 \cdot 10^{-5}$ мг/(см²*ч), в смеси азотной и соляной кислот с водой в отношении 1:1:1 она возрастает до 60 мг/(см²*ч), а в смеси азотной и плавиковой равна 1200 мг/(см²*ч).

Нелегированный арсенид галлия имеет электронный тип проводимости с концентрацией носителей заряда $n = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³ и подвижностью электронов $\mu_n = 8000$ м²/(В*с). При легировании цинком образуется арсенид галлия дырочного типа проводимости с концентрацией носителей заряда $10^{17} \dots 10^{20}$ см⁻³ и подвижностью дырок $\mu_p = 200$ м²/(В*с).

Для получения арсенида галлия с высоким удельным электрическим сопротивлением (от $\rho = 10^4$ до 10^9 Ом*см) расплав легируют железом и хромом до концентрации носителей заряда $n = 10^{17}$ см⁻³.

Арсенид галлия общего применения выпускают в виде монокристаллических слитков диаметром 12 мм. Эти слитки применяют для изготовления полупроводниковых приборов.

Арсенид галлия является основным материалом для производства полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 0,83 ... 0,92 мкм. Его широко используют для изготовления туннельных диодов, генераторов СВЧ-колебаний с частотой генерации до 100 ГГц, первичных преобразователей света, датчиков низких температур, а также при изготовлении некоторых типов интегральных микросхем.

Антимонид галлия $GaSb$ обладает следующими свойствами: кристаллизуется в кубическую гранецентрированную решетку; молекулярная масса $m = 191,48$; постоянная решетки 0,6 нм; плотность $D = 5,61$ г/см³; температура плавления 712 °С; диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 14,8$; показатель преломления 3,9; ширина запрещенной зоны при температуре 300 К $E_g = 0,67 \dots 0,72$ эВ; подвижность электронов при $T = 300$ °С $\mu_n = 0,4$ м²/(В*с).

Антимонид галлия чрезвычайно чувствителен к механическим напряжениям. При воздействии давления $4 \cdot 10^8$ Па удельное электрическое

сопротивление «чистого» антимонида галлия увеличивается в 2 раза.

Монокристаллические слитки антимонида галлия получают из поликристаллического материала выращиванием из расплава.

Благодаря высокой чувствительности к деформациям антимонид галлия применяют для изготовления тензометров. Он находит применение в производстве туннельных диодов и микроволновых детекторов.

Фосфид галлия GaP обладает следующими свойствами: кристаллизуется в структуру сфалерита; параметр решетки 0,54 нм; молекулярная масса $m = 100,7$; плотность в твердом состоянии $D = 4,1 \text{ г/см}^3$, в жидком – $D = 4,6 \text{ г/см}^3$; рабочая температура р-п-перехода 500°C ; ширина запрещенной зоны $E_g = 2,24 \text{ эВ}$.

Нелегированные кристаллы обладают дырочной электропроводностью; в качестве основного акцептора используют цинк, в качестве донорных примесей – теллур и серу.

Вследствие большой ширины запрещенной зоны фосфид галлия отличается высокой химической стойкостью, стоек на воздухе при нагревании до температуры $700 \dots 800^\circ\text{C}$, с кислородом и водяным паром при обычных условиях не реагирует, устойчив ко многим кислотным растворам.

Скорость растворения в концентрированной азотной кислоте при комнатной температуре $0,16 \text{ мг/}(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$, в соляной кислоте $0,01 \text{ мг/}(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$, в смеси азотной и соляной кислот, взятых в соотношении 1:3,

- 7,8 мг/(см²*ч). Более высокая скорость растворения наблюдается в плавиковой кислоте и смесях кислот с ее участием. При взаимодействии с кислотами выделяется очень токсичное вещество фосфин PH₃. Фосфид галлия устойчив к щелочным растворам.

Вследствие большой ширины запрещенной зоны излучательные переходы в фосфиде галлия приходится на видимую часть спектра, что определяет основную область их применения — производство светодиодов.

Арсенид индия InAs обладает следующими свойствами: кристаллизуется в кубическую гранецентрированную решетку; молекулярная масса $m = 189,67$; параметр решетки 0,6 нм; плотность $D = 5,56$ г/см³; температура плавления 943 °С; показатель преломления 3,9; диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 14$; ширина запрещенной зоны при температуре 300 К $E_g = 0,36$ эВ; подвижность электронов $\mu_n = 3,3$ м²/(В*с); подвижность дырок $\mu_p = 0,046$ м²/(В*с).

Арсенид индия применяют для изготовления датчиков Холла, фотодиодов, лазеров, а также приборов с гальваномагнитными эффектами.

Антимонид индия InSb обладает следующими свойствами: кристаллизуется в кубическую гранецентрированную решетку; постоянная решетки 0,64 нм; молекулярная масса $m = 263,58$; плотность $D = 5,77$ г/см³; температура плавления 525 °С.

Подвижность электронов превышает при низких температурах 10 м²/(В*с); фотопроводимость охватывает область, которая лежит в инфракрасной

части спектра с максимумом фотопроводимости, соответствующем длине волны 6,7 мкм.

Антимонид индия применяют для изготовления датчиков Холла, оптических фильтров и термоэлектрических генераторов холодильников. Очень высокую фоточувствительность антимонида индия используют для изготовления детекторов длинноволнового инфракрасного излучения (при охлаждении до 1,5 К), а также фоторезисторов.

Фосфид индия InP обладает следующими свойствами: температура плавления $1062^{\circ}C$; концентрация электронов в наиболее чистом фосфиде индия $n = 10^{21} \text{ м}^{-3}$; ширина запрещенной зоны $E_g = 1,29 \text{ эВ}$; диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 14$.

Применяют фосфид индия для изготовления лазеров.

9.3. Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{IV}$ и другие халькогениды.

Большую группу полупроводниковых материалов составляют бинарные, или двойные, соединения халькогенов (серы, селена, теллура) с металлами всех групп периодической системы элементов.

Основные свойства соединений типа $A^{II}B^{IV}$. Полупроводниковые материалы этого типа представляют собой химические соединения халькогенов с металлами второй группы – цинком, кадмием, ртутью.

Кристаллизуются соединения $A^{II}B^{IV}$ в структурах двух типов: кубической, образующейся при низких температурах, и гексагональной.

Каждый атом в этих решетках связан с четырьмя соседними, причем две связи носят ковалентный характер, а две – ионный. Так же, как и в соединениях типа $A^{III}B^V$, прочность связи атомов в кристаллической решетке внутри каждой группы (сульфидов, селенидов, теллуридов) уменьшается при увеличении суммарного атомного номера. Соответственно уменьшаются ширина запрещенной зоны, температура плавления (от 1830 до 670 °C) и химическая стойкость. Основные параметры приведены в таблице 9.3.1.

Таблица 9.3.1. Некоторые параметры основных соединений типа $A^{II}B^{IV}$.

Соединение	Плотность, Кг/м ³	Температура плавления, °C	Ширина запретной зоны, E _г	Подвижность, м ² /(В*с)	
				Электронов	дырок
ZnS	4080	1830	3,7	0,014	0,0005
ZnSe	5260	1515	2,7	0,07	0,0028
ZnTe	5700	1295	2,2	0,145	0,03
CdS	4820	1750	2,4	0,024	0,005
CdSe	5810	1258	1,8	0,06	0,005
CdTe	5860	1098	1,5	0,06	0,006
HgSe	8260	800	0,6	1,8	-

Все эти материалы обладают высокой чувствительностью к излучению в различных частях спектра – от инфракрасного до рентгеновского, ярко проявляя фоторезистивные и люминесцентные

свойства. Этим обусловлена область применения соединений типа $A^{II}B^{IV}$. Их используют в основном в качестве люминофоров для всех видов люминесценции и материалов для фоторезисторов. В качестве активаторов люминофоров на основе соединений типа $A^{II}B^{IV}$ используют металлы I группы (серебро, медь), а также редкоземельные металлы.

Технология получения соединений типа $A^{II}B^{IV}$ довольно проста. Поликристаллы получают чаще всего осаждением из водных растворов солей с помощью H_2S . Таким образом получают сульфиды и теллуриды. Для получения теллурида кремния и селенидов используют непосредственное сплавление исходных компонентов.

Соединения типа $A^{II}B^{IV}$ используют как в монокристаллическом, так и в поликристаллическом виде (пленки). Монокристаллы получают выращиванием из расплава и направленной кристаллизацией. Эпитаксиальные пленки получают осаждением из паровой фазы на ориентированные подложки. Поликристаллические пленки соединений типа $A^{II}B^{IV}$ получают чаще всего методом катодного распыления в вакууме с последующей рекристаллизацией отжигом. Такие пленки обладают высоким пьезомодулем и находят применение наряду с пьезоэлектриками в качестве преобразователей электромагнитных колебаний в акустические в диапазонах ВЧ и СВЧ.

Халькогениды цинка. Из соединений $A^{II}B^{IV}$ наибольшее распространение получил *сульфид цинка* ZnS .

Удельное сопротивление кристаллов сульфида цинка составляет $10^6 - 10^{12}$ Ом*м, а ширина запретной зоны около 3,7 эВ. Таким образом, по электропроводности и ширине запретной зоны сульфид цинка близок к диэлектрикам.

Нелегированные кристаллы сульфида цинка обладают электронной электропроводностью. Для получения дырочной электропроводности используют легирование элементами I группы.

Сульфид цинка в виде кристаллического порошка (реже в виде пленок) широко используют для изготовления люминофоров различных приборов: осциллографических и телевизионных электронно-лучевых трубок, люминесцентных осветительных и цифровых ламп и др.

Монокристаллы ZnS используют в качестве оптического материала, прозрачного в инфракрасной области спектра, для создания лазеров с длиной волны $\lambda = 0,32$ мкм, а также для пьезоусилителей акустических колебаний.

Халькогениды кадмия. Основным материалом для фоторезисторов и фотоэлементов является *сульфид кадмия* CdS .

Он всегда обладает электронной электропроводностью. Удельное сопротивление под влиянием различных факторов (примесей,

температуры, излучения) изменяется от 0,1 до 10^7 Ом*м. Сульфид кадмия является самым чувствительным фоторезистором в видимой части спектра: при освещении его сопротивление уменьшается в $10^4 - 10^6$ раз. Сульфид кадмия используют в качестве люминофора, для изготовления дозиметров ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма лучей, счетчиков частиц и др.

Халькогениды элементов других групп. Типичными полупроводниковыми соединениями типа $A^{IV}B^{VI}$ являются халькогениды свинца: *сульфид свинца PbS , селенид свинца $PbSe$ и теллурид свинца $PbTe$.* Халькогениды свинца кристаллизуются в кубической решетке. Халькогениды свинца не растворяются в воде, медленно окисляются на воздухе. Для травления их используют нагретую соляную и азотную кислоту, горячие растворы щелочей.

Халькогениды свинца являются узкозонными полупроводниками с $E_g = 0,22 - 0,3$ эВ.

Электропроводность халькогенидов свинца очень чувствительна к нарушениям состава. Незначительный избыток свинца (0,003% для $PbSe$) приводит к появлению электронной электропроводности, такой же избыток халькогена - к появлению дырочной электропроводности.

Акцепторными примесями в халькогенидах свинца являются металлы I группы (Ag, K, Na, Cu), замещающие атомы свинца, и галогены VI группы,

замещающие атомы халькогена.

Халькогениды свинца обладают фоторезистивными свойствами. При низких температурах в халькогенидах свинца становится существенной излучательная комбинация носителей заряда, что позволяет использовать эти соединения для создания лазеров инфракрасного диапазона.

Таблица 9.3.2. Основные параметры халькогенидов свинца, сурьмы и висмута.

Соединение	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °C	Коэффициент теплопроводности Вт/(м*К)	Ширина запретной зоны, E _g	Подвижность, м ² /(В*с)	
					Электронов	дырок
PbS	7600	1114	2,94	0,3	0,03	0,02
PbSe	8150	1076	1,7	0,22	0,18	0,09
PbTe	8160	917	1,7	0,25	0,14	0,11
Sb ₂ S ₃	4640	546	-	1,6	-	-
Bi ₂ Se ₃	7400	706	2,5	0,36	0,06	-
Bi ₂ Te ₃	-	585	1,2	0,15	0,12	0,05

Теллурид свинца, обладающий высоким коэффициентом термо-ЭДС и малой теплопроводностью, является эффективным материалом для создания полупроводниковых термоэлементов, работающих при температурах 300 – 700 °C.

Халькогениды элементов V группы. Из полупроводниковых соединений типа A₂^VB₃^{VI} нашли применение сульфид сурьмы Sb₂S₃, селенид и теллурид висмута Bi₂Se₃ и Bi₂Te₃.

Соединения типа $A_2^V B_3^{VI}$ кристаллизуются в виде ромбических и ромбоэдрических структур, обладающих низкой симметрией. Поэтому они обнаруживают сильную анизотропию свойств даже в пленочных образцах.

Высокой чувствительностью обладает сульфид сурьмы. Это соединение используют для изготовления фотопроводящих мишеней передающих телевизионных трубок. Сульфид сурьмы обладает также высоким значением коэффициента термо-ЭДС – до 100 мкВ/К.

10. Применение полупроводниковых материалов.

10.1. Контакт полупроводника с металлом.

Действие большинства полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, интегральных микросхем, лазеров и т.д.) основано на явлениях, происходящих или на поверхности полупроводника, или на контакте полупроводника с металлом, или на очень узкой границе областей полупроводника с различными свойствами.

Электрические переходы между металлом и полупроводником являются неотъемлемой частью любого, без исключения, полупроводникового прибора. Прежде всего, переходы металл – полупроводник используются для создания токопроводящих электродов к прибору – *омических переходов металл – полупроводник*, электрическое сопротивление которых мало и в заданном диапазоне

рабочих токов практически не зависит от направления тока.

Переходы металл – полупроводник, обладающие выпрямляющими свойствами, называют *переходами Шоттки*, а диоды на их основе – *диодами Шоттки*.

Процессы в таких переходах зависят от *работы выхода электронов*, т. е. от той энергии, которую должен затратить электрон, чтобы выйти из металла или полупроводника. Чем меньше работы выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

Если в контакте металла с полупроводником *n* – типа работа выхода из металла Φ_m меньше, чем работа выхода из полупроводника Φ_n , то будет преобладать выход электронов из металла в полупроводник. Поэтому в слое полупроводника около границы накапливаются основные носители заряда (электроны), и этот слой становится обогащенным, т. е. в нем увеличится концентрация электронов. Сопротивление этого слоя будет малым и, следовательно, такой контакт не обладает выпрямляющими свойствами. Его называют *омическим*.

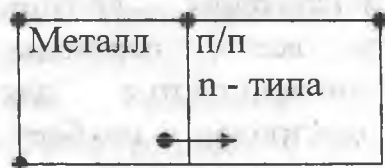


Рис. 10.1.1. Контакт металл – полупроводник *n* – типа при условии $\Phi_m < \Phi_n$.

Подобный невыпрямляющий переход получается в контакте металла с полупроводником р – типа, если работа выхода электронов из полупроводника меньше, чем из металла ($\Phi_n < \Phi_m$). В этом случае из полупроводника в металл уходит больше электронов, чем в обратном направлении, и в приграничном слое полупроводника образуется область, обогащенная основными носителями (дырками), имеющая малое сопротивление.

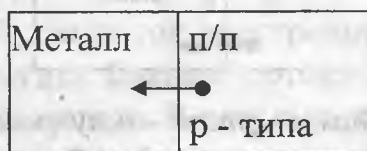


Рис. 10.1.2. Контакт металл – полупроводник р – типа при условии $\Phi_n < \Phi_m$.

Иные свойства имеет контакт металла с полупроводником n – типа при условии $\Phi_n < \Phi_m$. В этом случае электроны будут переходить, главным образом, из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями заряда и поэтому имеющая большое сопротивление. Такой переход обладает выпрямляющими свойствами.

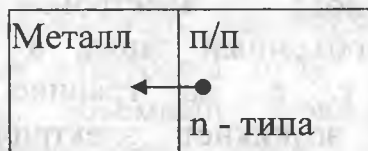


Рис. 10.1.3. Контакт металл – полупроводник n - типа при условии $\Phi_n < \Phi_m$.

Аналогичные выпрямляющие свойства имеет контакт металла с полупроводником р – типа при условии $\Phi_m < \Phi_n$. Электроны будут переходить из металла в полупроводник и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями заряда (дырками) и поэтому имеющая большое сопротивление.

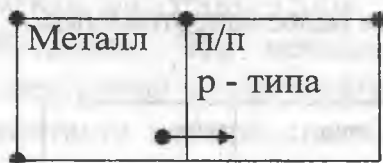


Рис. 10.1.4. Контакт металл – полупроводник р – типа при условии $\Phi_m < \Phi_n$.

Контакт металл – полупроводник при отсутствии внешнего напряжения. Допустим, что имеется контакт металл – полупроводник п – типа при условии $\Phi_n < \Phi_m$. Если между металлом и полупроводником создать надежный контакт (вплавление или напыление металла), то в первый момент из соприкосновения поток электронов из полупроводника будет больше встречного потока из металла. Это приведет к тому, что в полупроводнике вследствие ухода электронов появится положительный объемный заряд, а в металле – отрицательный, т. е. на границе металла и полупроводника возникнет электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов. В результате ухода электронов приконтактная

область электронного полупроводника будет обеднена носителями заряда, в ней возникнет слой с пониженной проводимостью, называемый *запирающим слоем*.

В дырочном полупроводнике при том же соотношении работ выхода электронов концентрация основных носителей заряда – дырок увеличится, т.е. создастся слой, обогащенный носителями. Такой слой с повышенной электропроводностью называют *антизапирающим*.

Если $\Phi_m < \Phi_n$, то поток электронов из металла в полупроводник будет больше потока электронов из полупроводника в металл. В результате концентрация основных носителей в приконтактной области электронного полупроводника увеличится, а дырочного – уменьшится; соответственно в электронном полупроводнике создастся антизапирающий слой, а в дырочном – запирающий.

Контакт металл – полупроводник при подаче прямого напряжения. Если металл с большей величиной работы выхода подключен к положительному полюсу источника, а электронный полупроводник с меньшей работой выхода – к отрицательному полюсу, то приходящие под действием приложенного напряжения из глубины полупроводника электроны будут компенсировать положительный объемный заряд и уменьшать ширину запирающего слоя. Следовательно, сопротивление запирающего слоя уменьшится, а ток через переход будет велик.

Контакт металл – полупроводник при подаче обратного напряжения. Если полупроводник подключить к положительному, а металл – к отрицательному полюсу источника, то электроны будут уходить из запирающего слоя в глубь полупроводника. В то же время поток электронов из металла в полупроводник не увеличится, так как практически все контактное поле сосредоточено на запирающем слое полупроводника. Следовательно, ширина и сопротивление запирающего слоя увеличатся, и ток через переход будет мал.

Аналогичные процессы будут происходить при контакте металла с дырочным полупроводником, но при $\Phi_m < \Phi_n$. Таким образом, контакт металл – полупроводник при наличии запирающего слоя обладает выпрямляющими свойствами: ток через контакт практически может проходить только в одном направлении.

10.2. Контакт электронного и дырочного полупроводника.

Область на границе двух полупроводников с различными типами электропроводности называется электронно-дырочным или $p - n$ – переходом. Работа большинства полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т. д.) основана на использовании свойств одного или нескольких $p - n$ - переходов.

Чтобы такое соединение привело к изменению зонной структуры полупроводника, необходимо,

чтобы ширина $p - n$ — перехода была сравнима с периодом кристаллической решетки материала, т. е. имела бы величину порядка 10^{-10} м. Механическим соединением полупроводников такой плотный контакт получить не удастся. Поэтому для создания $p - n$ — перехода на полупроводнике одного типа электропроводности наращивают тонкий слой полупроводникам с другим типом электропроводности или в полупроводник с одним типом электропроводности диффундируют или вводят примесь, создающую другой тип электропроводности.

$p - n$ — переход при отсутствии внешнего напряжения. Так как носители заряда в каждом полупроводнике совершают беспорядочное тепловое движение, т. е. имеют собственные скорости, то происходит диффузия из одного полупроводника в другой. Носители перемещаются оттуда, где их концентрация больше, туда, где их концентрация меньше. Таким образом, из полупроводника n — типа в полупроводник p — типа диффундируют (перемещаются) электроны, а в обратном направлении диффундируют дырки.

В результате диффузии носителей по обе стороны границы раздела двух полупроводников с различным типом электропроводности создаются *объемные заряды* различных знаков. В области n возникает положительный объемный заряд. Он образован, главным образом, положительно

заряженными атомами донорной примеси и в небольшой степени пришедшими в эту область дырками. Подобно этому в области p возникает отрицательный объемный заряд, образованный отрицательно заряженными атомами акцепторной примеси, и, отчасти, пришедшими сюда электронами. Между образовавшимися объемными зарядами возникают *контактная разность потенциалов* $U_k = \phi_n - \phi_p$ и электрическое поле (вектор напряженности E_k).

Контактная разность потенциалов возникшего электрического поля, как и в случае контакта металл — полупроводник, определяется разностью работ выхода электронов из электронного и дырочного полупроводника. Направление возникшего поля E_k таково, что оно будет препятствовать дальнейшему переходу основных носителей из одной области в другую, т. е. для основных носителей заряда образуется потенциальный барьер. В результате установится динамическое равновесие между током диффузии ($I_{\text{дифф}}$) основных носителей и током проводимости ($I_{\text{пров}}$) неосновных носителей заряда, для которых образовавшееся поле будет ускоряющим. Высота потенциального барьера тем больше, чем больше концентрация носителей в каждой области, т. е. чем сильнее легированы примесями p и n области полупроводника. Вследствие ухода основных носителей концентрация их в зоне перехода, а, следовательно, и электропроводность перехода резко уменьшаются.

Р — п — переход при подаче прямого напряжения. Подключим р — область к положительному полюсу источника, а п — область — к отрицательному. Тогда внешнее поле будет противоположно по направлению контактному полю, образовавшемуся вследствие диффузии основных носителей заряда. Следовательно, высота потенциального барьера и толщина запирающего слоя уменьшатся, а ток диффузии $I_{\text{дифф}}$ основных носителей заряда возрастет. Происходит инжекция основных носителей заряда, т. е. перемещение их в область, где они являются неосновными: дырок в п — область, а электронов в р — область. При увеличении напряжения внешнего источника потенциальный барьер может вообще исчезнуть, появится потенциальный «скат» для электронов в р — область, а для дырок — в п — область, и ток через переход возрастет еще больше. Таким образом, при подаче на р — п — переход прямого напряжения переход открыт, сопротивление его мало, и через него проходит большой прямой ток.

Р — п — переход при подаче обратного напряжения. Теперь изменим полярность подключения внешнего источника: к р — области подключим отрицательный, а к п — области положительный полюс. Тогда направление внешнего поля будет совпадать с направлением внутреннего контактного поля, и величина потенциального барьера возрастет.

Основные носители заряда не смогут преодолеть его, и ток через переход будет определяться только неосновными носителями. Но так как концентрация неосновных носителей, электронов в p – области и дырок в n – области много меньше концентрации основных носителей, то и величина тока будет много меньше. Иначе говоря, при такой полярности подключения внешнего источника p – n - переход закрыт, сопротивление его велико, и через него проходит только малый обратный ток неосновных носителей заряда. При дальнейшем увеличении обратного напряжения произойдет пробой p – n – перехода.

Таким образом, контакт электронного и дырочного полупроводника обладает выпрямляющими свойствами.

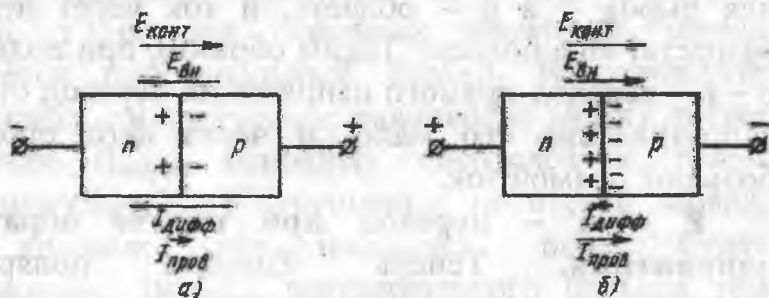


Рис. 10.2.1. P – n – переход при подаче прямого и обратного напряжения.

10.3. Туннельные диоды.

Носители заряда в туннельных диодах проходят сквозь потенциальный барьер за счет туннельного эффекта. В туннельных диодах в отличие от выпрямительных р и n области высоколегированны, т.е. уровень Ферми в таких полупроводниках расположен в различных зонах. Такие полупроводники называются вырожденными.

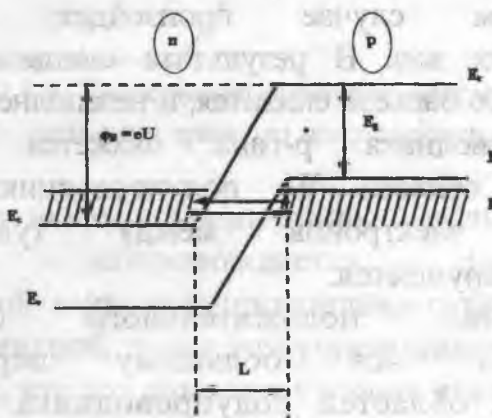


Рис. 10.3.1. Энергетическая диаграмма (условие равновесия $U=0$).

У вырожденных полупроводников, находящихся в вырожденной зоне, для n - типа уровень Ферми в зоне проводимости, для р - типа уровень Ферми находится в валентной зоне.

Такое расположение уровней Ферми приводит к возникновению увеличения контактной разности потенциалов (U_k), следовательно, при равновесии происходит перекрытие энергетических зон.

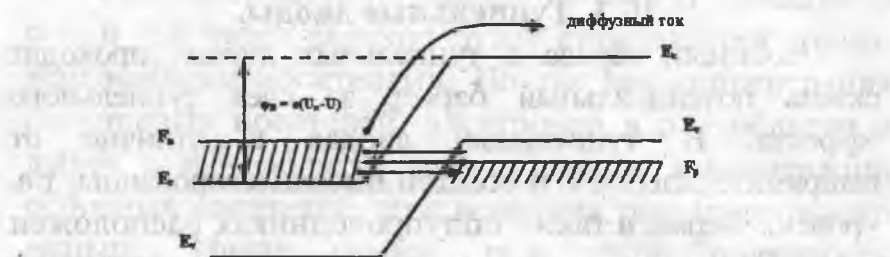


рис. 10.3.2. Туннельный диод при подаче прямого напряжения.

В этом случае произойдет смещение энергетических зон. В результате смещения высота потенциального барьера снизится, и незаполненная часть W_v полупроводника p-типа окажется напротив заполненной области W_c полупроводника n-типа. Равновесие электронов между туннельными переходами нарушается.

Повышение положительного смещения приводит к все большему перекрытию заполненных областей полупроводника n-типа и пустой области проводника p-типа, благодаря чему растет туннельный ток.

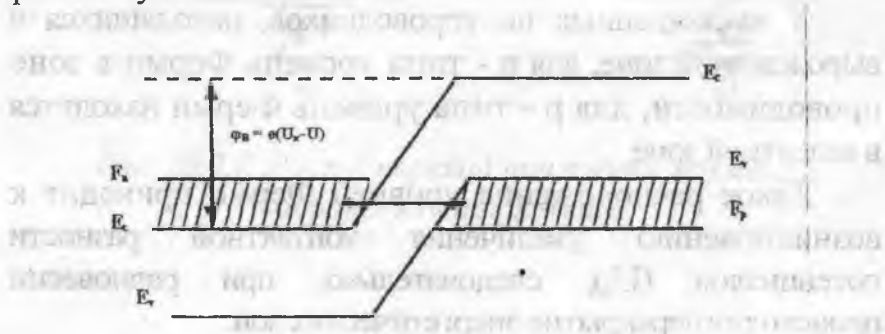


рис. 10.3.3. Туннельный диод при повышении прямого напряжения.

Максимальное значение туннельного тока достигается тогда, когда проводимость полупроводника n-типа располагается напротив валентного уровня полупроводника p-типа.

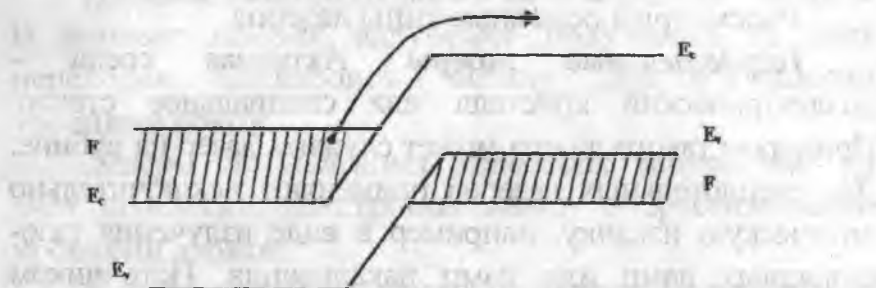


рис. 10.3.4. Туннельный диод при максимальном значении прямого напряжения.

Дальнейшее увеличение прямого тока смещения сопровождается уменьшением заполненной зоны полупроводника n-типа и пустой части валентной зоны полупроводника p-типа. А это значит, что ухудшаются условия для туннельного перехода электронов из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа.

10.4. Лазеры.

Классификация лазеров. В настоящее время существует множество типов лазеров. Они различаются *активной средой* и *способами накачки*. В качестве активной среды используются твердые, жидкие и газообразные вещества, а из многих способов накачки наиболее универсальными являются

оптическая накачка и накачка с помощью электрического разряда в самой активной среде. Накачка может быть также непрерывной и импульсной.

Рассмотрим основные типы лазеров.

Твердотельные лазеры. Активная среда - диэлектрический кристалл или специальное стекло. Примером такого лазера может служить лазер на рубине. Для твердотельных лазеров применяют исключительно оптическую накачку, например в виде излучения газоразрядных ламп или ламп накаливания. Источником накачки может быть и вспомогательный лазер.

Жидкостные лазеры. В качестве активной среды чаще всего используются растворы органических красителей или специальные жидкости, активированные ионами редкоземельных элементов. Для жидкостных лазеров применяют непрерывную накачку или импульсную оптическую накачку от вспомогательного лазера или от газоразрядной лампы.

Газовые лазеры. Существует много разновидностей таких лазеров. Одна из них - *фотодиссоционный лазер*. В нем применяется газ, молекулы которого под влиянием оптической накачки диссоциируют (распадаются) на две части, одна из которых оказывается в возбужденном состоянии и используется для лазерного излучения.

Большую группу газовых лазеров составляют *газоразрядные лазеры*, в которых активной средой является разряженный газ, а накачка осуществляется

электрическим разрядом, который может быть дуговым и созданным постоянным током или переменным током высокой частоты.

Имеется несколько типов газоразрядных лазеров. В *ионных лазерах* излучение получается за счет переходов электронов между энергетическими уровнями ионов.

Лазеры на атомных переходах генерируют за счет переходов электронов между энергетическими уровнями атомов.

К газоразрядным также относятся *молекулярные лазеры*, в которых излучение возникает от переходов электронов между энергетическими уровнями молекул.

Особый тип газового лазера - *плазменный лазер*. В нем активной средой является высокоионизированная плазма паров щелочноземельных металлов (магний, барий, стронций, кальций).

Полупроводниковые лазеры. Хотя они являются твердотельными, но их принято выделять в особую группу. В этих лазерах когерентное излучение получается за счет перехода электронов с нижнего края зоны проводимости на верхний край валентной зоны. Существует два типа полупроводниковых лазеров. Первый имеет пластину беспримесного полупроводника, в котором накачка производится пучком быстрых электронов. Накачка электронным пучком вызывает большое повышение температуры

полупроводника, за счет чего сильно ухудшается лазерное излучение, поэтому полупроводниковые лазеры нуждаются в хорошем охлаждении.

Второй тип полупроводникового лазера - *инжекционный*. В нем имеется электронно-дырочный переход, образованный двумя вырожденными примесными полупроводниками с различными типами проводимости. На такой лазер подается прямое напряжение, под действием которого потенциальный барьер понижается и происходит инжекция электронов и дырок. В области перехода начинается интенсивная рекомбинация носителей заряда, при которой электроны переходят из зоны проводимости в валентную зону, и возникает лазерное излучение.

Принцип работы лазеров. Для эффективного использования света в технике связи и в других областях науки и техники надо добиться синхронного (одинакового по времени) и синфазного (одинакового по фазе) излучения атомов, т.е. *когерентного излучения*. Можно представить себе упрощенную схему получения когерентного излучения. Пусть имеется цепочка атомов, вытянутая в прямую линию. Если все эти атомы находятся в возбужденном состоянии, то внешний фотон, ударив в крайний атом по направлению вдоль цепочки, вызовет излучение фотона из этого атома, при чем излученный фотон будет иметь энергию, точно такую же, что и ударивший. Таким образом, будет двигаться уже два одинаковых фотона.

Аналогично произойдет излучение второго фотона из второго атома, и будет двигаться уже три одинаковых фотона и т.д. В результате, световой поток будет усиливаться в большое число раз. Важно, что в процессе такого усиления будет двигаться огромная армия фотонов, имеющих одинаковую энергию и одинаковое направление движения, т.е. излучение будет когерентным.

В действительности кроме атомов, находящихся в возбужденном состоянии и способных дать когерентное излучение под действием фотонной бомбардировки, всегда имеются и атомы, находящиеся в основном, невозбужденном состоянии. Эти атомы поглощают энергию ударивших в них фотонов и тем самым уменьшают энергию выходного излучения, т.е. уменьшают усиление света.

Если число возбужденных атомов равно числу невозбужденных атомов, то никакого излучения происходить не будет. Следовательно, для усиления света и получения когерентного излучения необходимо, чтобы число возбужденных атомов было больше, чем число невозбужденных.

Для этого надо к основному веществу, называемому активной средой подводить тем или иным способом энергию, вызывающую возбуждение атомов. Такой процесс получил название *накачки*.

Мы рассмотрели принцип создания усилителя света, получившего название *лазер* - от начальных букв английских слов *light amplification by stimulated*

emission of radiation, означающих «усиление света с помощью вынужденного излучения».

Квантовый усилитель света можно превратить в генератор. Для этого нужно осуществить положительную обратную связь, при которой часть энергии излучения с выхода возвращается на вход и снова усиливается.

Принцип такого генератора можно пояснить следующим образом (Рис.8.2.1). В пространстве, заполненном активной средой, между двумя плоскими зеркалами, одно из которых (2) полупрозрачное, движется поток излучаемых атомами фотонов от конца 1 к концу 2. Большая часть этого потока проходит через полупрозрачное зеркало во внешнюю среду, меньшая часть отражается на зеркало 1 и вновь на зеркало 2, усиливаясь по пути, затем вновь отражается и т.д. Конечно, какой-то источник должен постоянно поддерживать инверсное состояние активной среды и тогда через зеркало 2 во внешнюю среду все время будет излучаться когерентное излучение.



рис. 10.4.1. Принцип устройства лазера.

Практическое применение лазерного излучения. В настоящее время лазеры получили широкое применение в науке и технике. Возникла новая область физики — *нелинейная оптика*, в которой изучается взаимодействие мощного лазерного излучения с различными веществами.

Лазерный луч может проникать через вещества, непрозрачные для обычного света. При этом возможно явление *самофокусировки*. Иногда наблюдается увеличение частоты лазерного излучения в 2 - 3 раза, если оно проходит через некоторые вещества, например, инфракрасное излучение становится зеленым, частота которого в два раза выше. Такое явление называют генерацией гармоник.

Лазерное излучение способно управлять движением атомов. Взаимодействие лазерного излучения с атомами вещества вызывает появление в спектре этого вещества новых линий, по которым можно судить о некоторых ранее неизвестных свойствах вещества.

Важная область применения лазерного излучения - связь. Для лазерной связи характерна высокая направленность и огромный диапазон частот, позволяющий разместить практически неограниченное число передач различных видов информации. Посредством лазерного излучения можно одновременно передавать десятки тысяч телевизионных программ или миллионы телефонных переговоров.

Конечно, для наземной лазерной связи создаются помехи в виде различных образований в атмосфере (дождь, снег, туман и т.д.). Таких препятствий можно избежать несколькими способами, например, в космосе, где возможна связь на огромные расстояния. Или на земле, если передавать сигнал по специальным световодам. Световоды представляют собой специальные кабели из стекла или прозрачной пластмассы. Эти вещества обладают высокой прозрачностью и не вызывают большого затухания лазерного луча.

Кроме устройств связи лазерное излучение используют в локаторах, которые имеют более высокую точность, чем радиолокаторы. Лазерные лучи применяются для геодезических измерений, для резки и сварки различных материалов, в том числе сверхтвердых. Все эти операции производятся с очень высокой точностью. Лазерное излучение может также оказывать большое влияние на протекание химических реакций.

На использовании лазерного луча основана *голография* - область науки и техники, занимающаяся получением объемных изображений, а также оптической обработкой информации и ее хранением. Лазерные излучения используются для высококачественной записи информации на носители (лазерные диски).

Области применения лазерного излучения непрерывно расширяются.

11. Диэлектрические материалы

11.1. Назначение и классификация диэлектрических материалов.

Диэлектрики — это вещества, у которых запретная зона настолько велика, что в нормальных условиях электропроводность у них отсутствует. Диэлектрические материалы имеют чрезвычайно важное значение для электротехники. К ним принадлежат электроизоляционные материалы, которые используются для создания электрической изоляции токоведущих частей электрических устройств. Электроизоляционные материалы по агрегатному состоянию разделяют на твердые, жидкие и газообразные; особую группу составляют твердеющие материалы, которые в том состоянии, в котором они вводятся в электрическую изоляцию, являются жидкими или пластичными, но в готовой, работающей изоляции — твердыми веществами (например, клеи, лаки, эмали).

По химическому составу электроизоляционные материалы разделяются на органические — соединения углерода с водородом, азотом, кислородом, с некоторыми другими элементами — неорганические. Особая группа материалов — элементоорганические, в молекулы которых входят атомы элементов, не характерных для обычных органических веществ, — кремния, магния, алюминия, титана и др.

Как правило, неорганические материалы имеют более высокую нагревостойкость, чем органические материалы.

К диэлектрическим материалам относятся диэлектрики, применяемые в конденсаторах, когда требуется иметь определенную электрическую емкость устройства, а также активные диэлектрики, то есть диэлектрики с управляемыми свойствами: сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты.

11.2. Электрические свойства.

Поляризация диэлектриков – это, процесс, состоящий в ограниченном смещении или ориентации связанных зарядов в диэлектрике при воздействии на него электрического поля. Поляризация приводит к образованию в каждом элементарном объеме диэлектрика dV индуцированного (наведенного) электрического момента dp . Интенсивность поляризации диэлектрика определяется поляризованностью

$$P = \frac{dp}{dV}$$

Степень поляризованности диэлектрика оценивается относительной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0}$$

Заряд конденсатора, когда между обкладками находится диэлектрик, определяется по формуле

$$Q = Q_0 + Q_g$$

Q_0 — заряд конденсатора, в котором диэлектриком является вакуум, Q_g — заряд, обусловленный поляризацией.

Электропроводность диэлектриков носит ионный характер, т.е. носителями зарядов являются ионы.

$$\rho = \frac{1}{\gamma}$$

Диэлектрические потери. При взаимодействии электрического поля на любое вещество часть потребляемой им электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается. Рассеянную часть поглощенной диэлектриком электрической энергии называют *диэлектрическими потерями*.

Пробой. Явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называют *пробоем*. Минимальное напряжение, приводящее к пробое диэлектрика, называют *пробивным напряжением* $U_{пр}$.

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}$$

E – напряженность электрического поля, h – толщина диэлектрика в месте пробоя.

11.3. Механические свойства.

Упругость – это свойство материала восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних сил, которые вызывают их изменение.

Вязкость – это способность материала оказывать сопротивление динамическим (быстрорастущим) нагрузкам.

Прочность – это способность материала сопротивляться действию внешних сил, не разрушаясь.

11.4. Тепловые свойства.

Нагревостойкость – это способность диэлектрика функционировать при повышенных температурах или при резкой смене температур без недопустимого ухудшения его свойств. Теплостойкость по Мартенсу для некоторых диэлектриков следующая: 75...90 °C – для полистирола, 80...90 °C – для полиэтилена, 150...200 °C – для стеклотекстолита.

Теплопроводность – это способность диэлектрика проводить теплоту. Количественно теплопроводность оценивается коэффициентом теплопроводности γ_t , который определяется количеством теплоты, прошедшей через единицу площади в единицу времени.

Для оценки теплопроводности используют также температуропроводность

$$A = \frac{\gamma_T}{c} * D$$

D – плотность материала, кг/м^3 ; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг*К) .

Тепловое расширение – это свойство диэлектрика изменять свои линейные размеры под действием температуры.

Холодостойкость – это способность электрической изоляции работать при низких температурах без допустимого ухудшения эксплуатационных характеристик. Предельно допустимые низкие рабочие температуры: - 269°C для фторопласта, - $(50...60)^\circ\text{C}$ для лавсана, - $(40...70)^\circ\text{C}$ для полиэтилена, - 40°C для полистирола, - 20°C для капрона, - $(5...15)^\circ\text{C}$ для полипропилена.

11.5. Влажностные свойства.

Влагостойкость – это способность материала сохранять свои эксплуатационные свойства при воздействии влаги.

Гигроскопичность – способность материала поглощать водяные пары из окружающей атмосферы.

$$W_r = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100\%$$

m_1 – масса сухого образца, г; m_2 – масса образца после выдержки его в условиях относительной влажности 96...98%.

Водопоглощаемость – это способность материала поглощать воду. Она определяется относительным приращением массы образца после выдержки его в воде в течение 24 часов.

$$W_B = \frac{m_3 - m_1}{m_1} * 100\%$$

m_3 – масса образца после выдержки его в воде;
 m_1 – масса образца в исходном состоянии.

Влагопроницаемость – способность материала пропускать сквозь себя пары воды.

11.6. Физико-химические свойства.

Растворимость. Различные материалы при соприкосновении друг с другом в процессе изготовления или эксплуатации изделий могут частично или полностью проникать друг в друга. Такой переход называют *растворимостью*. Это свойство важно для подбора растворителей лаков или оценки стойкости электроизоляционных материалов к действию различных жидкостей, с которыми они контактируют.

Химостойкость. При соприкосновении химически активными веществами (газами, водой,

кислотами, щелочами, солевыми растворителями) электроизоляционные материалы могут вступать с ними в химическое взаимодействие и разрушаться. Химостойкость — это способность материалов противостоять химически активным веществам.

Светостойкость - это способность материалов сохранять свои эксплуатационные характеристики под действием светового облучения.

Радиационная стойкость - это способность диэлектрика сохранять свои эксплуатационные характеристики при взаимодействии ионизирующего излучения. К ионизирующему излучению относят корпускулярное и волновое излучение.

Заключение.

Данный учебник предназначен для использования преподавателями и студентами в качестве основного или дополнительного материала при разработке и подготовке к лекционным и семинарским занятиям, а также для самостоятельного изучения.

Первые главы учебника посвящены основным сведениям о материалах. В следующих главах учебника рассмотрены различные классы широко применяемых электротехнических материалов: проводников, полупроводников, диэлектриков; описаны основные свойства; изложены основы физических явлений, происходящих в них; представлены требования, предъявляемые к этим материалам; область их применения. Большое внимание уделено полупроводниковым приборам.

Чтобы правильно использовать электротехнические материалы, необходимо представлять себе физическую сущность явлений, характерных для каждого типа материалов при его взаимодействии с электрическими и магнитными полями, а также при влиянии на него основных физико-технологических факторов.

Поэтому каждая часть учебника начинается с рассмотрения физических процессов, происходящих в материалах.

Без знания структуры электротехнических материалов невозможно правильное понимание

электрических и магнитных материалов, их механической прочности, процессов старения и т.д.

Предназначается для студентов специальностей "Программное и аппаратное обеспечение вычислительной техники и сетей", "Физика и информатика", "Промышленное и гражданское строительство". Может быть использован в качестве дополнительного материала студентами специальности "Технология труда и предпринимательство".

Литература.

1. Гуляев А.П. Металловедение. М: 1977 год.
2. Джаманбалин К.К., Козкина Н.Н. Элементная база ЭВМ. Костанай: 2003 год.
3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение. М: 2000 год.
4. Калинин Н.Н., Скибинский Г.Л., Новиков П.П. Электрорадиоматериалы. М: 1981 год.
5. Никулин В.Н. Электроматериаловедение. М: 1991 год.
6. Онищенко В.И., Мурашкин С.У., Коваленко С.А. Технология металлов и конструкционные материалы. М: 1991 год.
7. Ростовиков В.И., Черток Б.Е. Электрорадиоматериалы. Киев: 1975 год.
8. Электрорадиоматериалы. Под ред. Б.М. Тареева. М: 1978 год.

**Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич
Тарабаева Олеся Валерьевна**

**«ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ»
УЧЕБНИК
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
ВУЗОВ.**

**Верстка
Тарабаева О.В.
Козкина Н.Н.**

© Костанайский социально-технический университет, 2004
год.

*Бумага офсетная. Гарнитура «Times»
Объем 8,0 печ. л. Тираж 500 экз.*

*Отпечатано ОАО «Костанайский печатный двор»,
458003, г. Костанай, ул. Темирбаева, 39,
Тел. (8-314-2) 53-54-60, 53-54-92
E-mail: kpdvor@mail.kz*